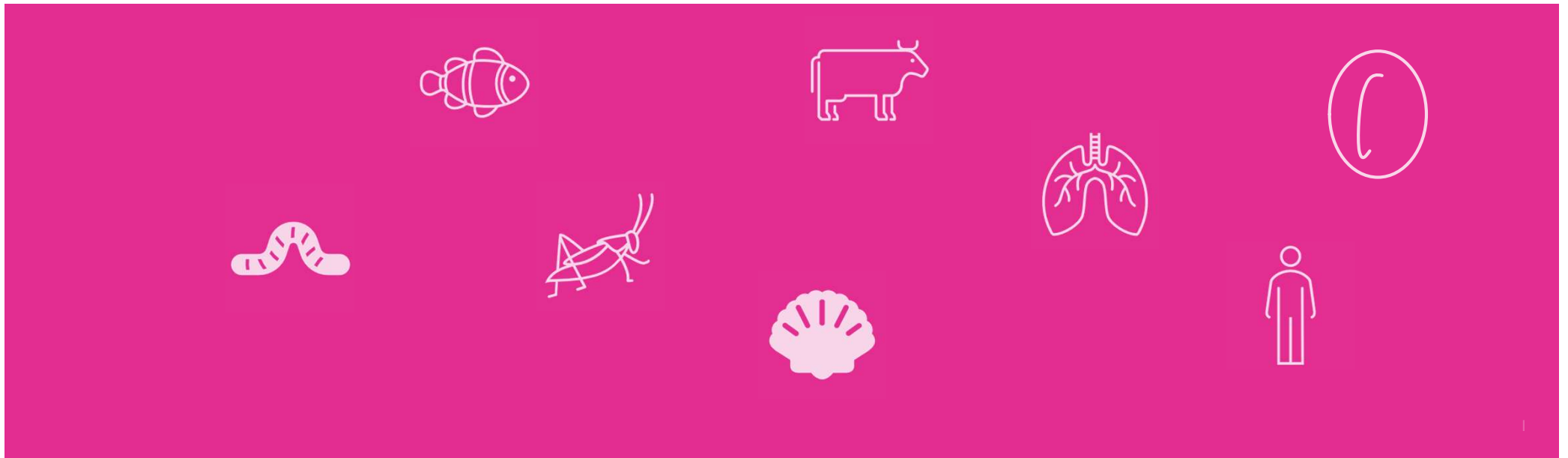


SV-B-I LA RESPIRATION : UNE FONCTION EN INTERACTION DIRECTE AVEC LE MILIEU

SV-B INTERACTIONS ENTRE LES ORGANISMES ET LEUR MILIEU DEVIE



EXTRAIT DU B.O.

Savoirs visés

Les échanges respiratoires des Métazoaires sont réalisés au niveau de surfaces d'échange (spécialisées ou non), en lien avec les contraintes du milieu de vie. Les surfaces respiratoires spécialisées sont relativement étendues, fines, et en lien avec des dispositifs de renouvellement des fluides. Les échanges de gaz respiratoires se réalisent par diffusion simple, suivant la loi de Fick.

Dans le même milieu, pour des organisations différentes, des convergences fonctionnelles sont liées aux contraintes physico-chimiques du milieu de vie (aquatique ou aérien).

La convection externe et la convection interne des fluides maintiennent les différences de pression partielle à travers l'échangeur. L'efficacité de l'extraction de dioxygène varie suivant les milieux et les taxons.

L'hémoglobine est une molécule de transport des gaz respiratoires qui est présente dans les hématies de Mammifère.

La quantité de transporteurs limite la quantité de dioxygène transportée et l'activité de l'organisme. La modulation de la quantité de gaz échangés passe essentiellement par des variations contrôlées de la convection.

Capacités exigibles

- À partir des dissections de Mammifère (la souris), de Téléostéen, d'Hexapode (le criquet) et de Mollusque Bivalve (la moule) :

- dégager les grands traits de l'organisation des surfaces d'échanges respiratoires ;
- relier les structures observables avec les modalités de renouvellement des fluides de part et d'autre des surfaces respiratoires observées ;
- mettre en relation l'organisation des surfaces observées et les paramètres du milieu ;
- repérer les homologies et les convergences dans l'organisation de ces différentes structures.

- À partir de l'observation de préparations microscopiques ou de clichés d'histologie : identifier les caractéristiques structurales, à toutes les échelles, qui optimisent les échanges gazeux dans ces structures respiratoires ;

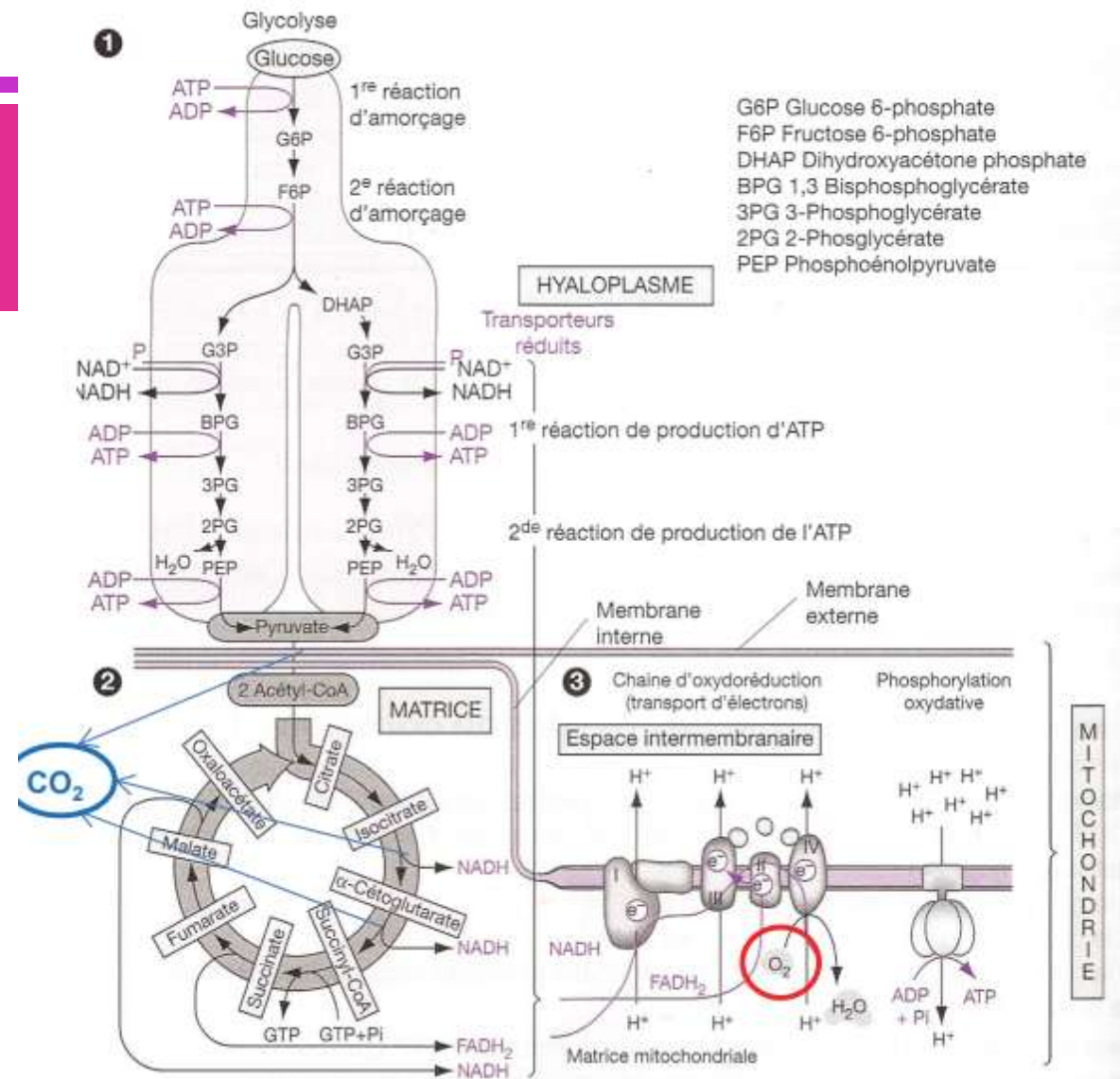
- Relier les propriétés de coopérativité de l'hémoglobine à ses capacités de fixation ou de relargage du dioxygène suivant les conditions locales.

- Exploiter la courbe de saturation de l'hémoglobine et la mettre en lien avec les conditions physiologiques régnant dans les poumons et les autres tissus.

- Expliquer l'action de différents paramètres sur le relargage tissulaire et la prise en charge pulmonaire du dioxygène par l'hémoglobine : teneur du sang en CO₂, teneur en 2,3 BPG des hématies, pH sanguin et température. Les relier aux conditions physiologiques.

FONCTION DE RESPIRATION

- Appartient à la fonction de nutrition
- Deux niveaux de définition de la respiration: interne (cellulaire) et externe
- Caractéristiques physiques des échanges respiratoires
- Application de la loi de Fick aux différentes échelles d'organisation des différents appareils respiratoires.
- Physiologie des échanges respiratoires en lien avec le milieu de vie (aérien vs aquatique).
- Échanges des gaz sanguins.



Représentation simplifiée de la respiration cellulaire 1. Glycolyse 2. Cycle de Krebs 3. Phosphorylation oxydative (D'après Breuil 2007)

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien
- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien
- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation
- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires
- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

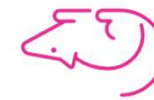
« Il se produit dans le matras une transformation chimique au cours de laquelle le dioxygène réagit avec le mercure pour former de l'oxyde de mercure HgO , rouge. »
Antoine de Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, 1789.

- 21% de dioxygène
- 78% « d'azote », sans vie cf mort de la souris

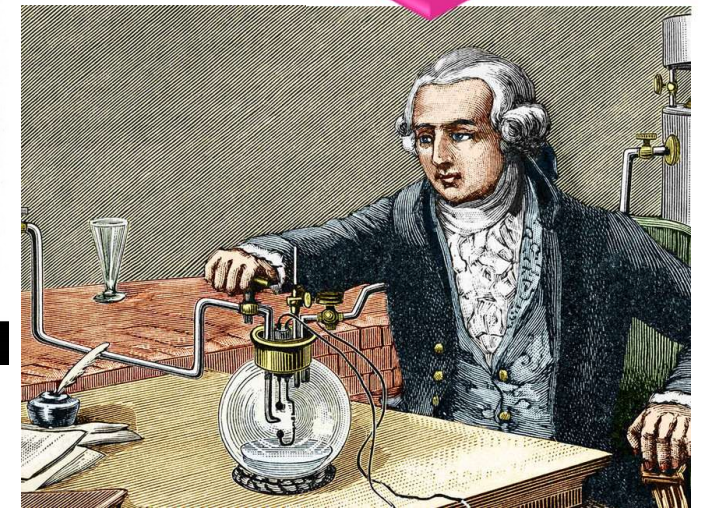
■ <https://youtu.be/surOJNts53E>



Fig. 17.—Lavoisier analysing Atmospheric Air.



« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. »



Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) dans son laboratoire



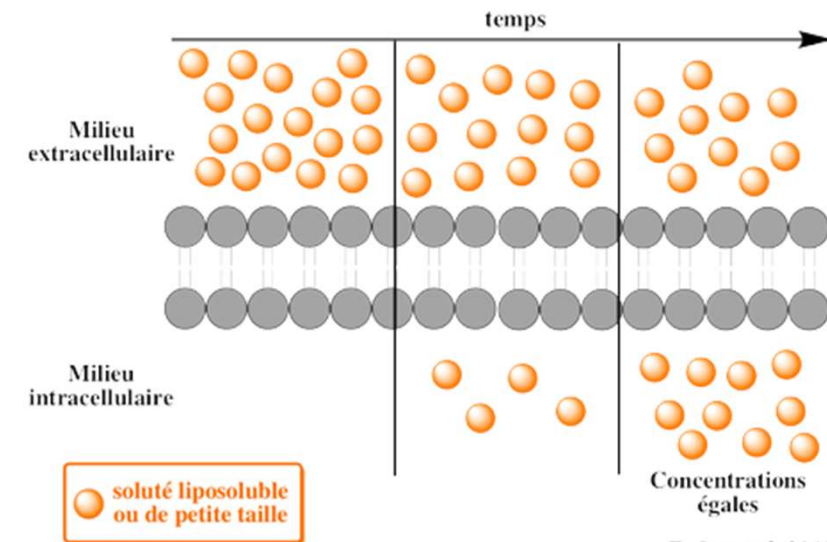
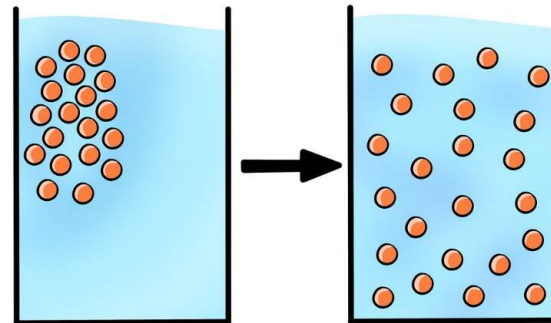
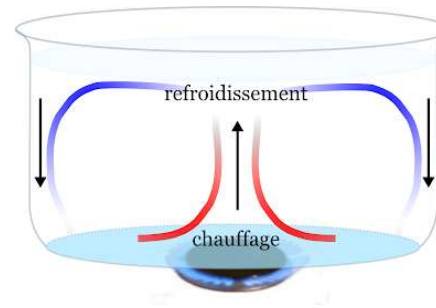
I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES



I. Transports de gaz par convection ou diffusion

- Par convection:
 - **transport de masse** dans un **fluide porteur** (liquide, gazeux), en suivant les mouvements liés aux différences de pression subies par ce fluide
- Par diffusion:
 - **déplacement moléculaire** selon le gradient de concentration



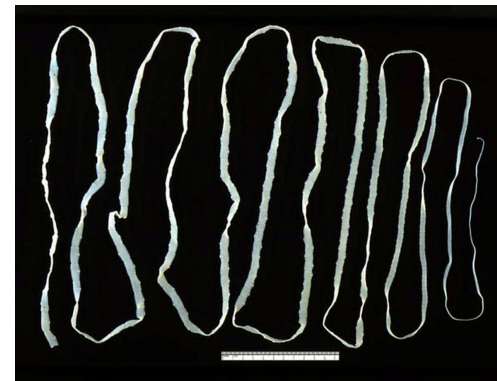
I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

I. Transports de gaz par convection ou diffusion

Diffusion seule ou convection interne ?

- *Tænia saginata* ou ver solitaire (plathelminthe)
Épaisseur : ~1 mm
→ Diffusion simple possible car S/V élevé, la surface de l'animal suffisante pour assurer diffusion

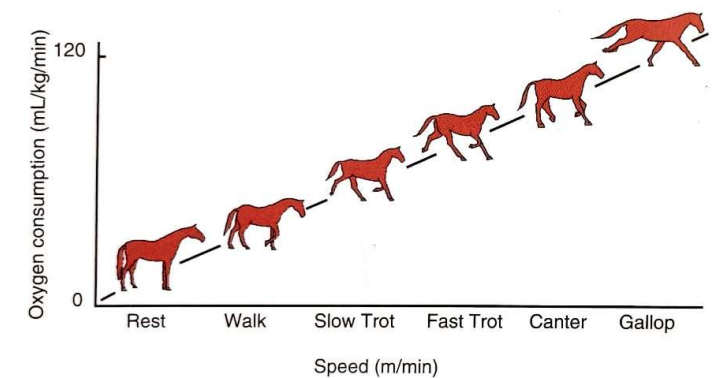


Tænia saginata ou ver solitaire
échelle: 1 m

- Cheval (mammifère)
Largeur : ~1 m
→ Diffusion simple non suffisante car:
 - ✓ Organisme de grande taille
 - ✓ S/V tend vers zéro
 - ✓ Métabolisme élevé
 - ⇒ Convection nécessaire



Poneys de New Forest



I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES



I. Transports de gaz par convection ou diffusion

- 4 étapes de la respiration chez bilatériens:
 - **Convection ventilatoire** ou ventilation (renouvellement des gaz en contact avec la surface respiratoire)
 - **Diffusion** par la surface d'échange respiratoire (entrée dans l'organisme)
 - **Convection circulatoire** au sein de l'organisme (au sein du système circulatoire)
 - **Diffusion du système circulatoire vers les organes consommateurs**
- entrée dans l'organisme de gaz respiratoires
 - ⇒ passage membranes cellulaires
 - pas de protéines transmembranaires transportant ces gaz
 - passage des membranes par diffusion simple, suivant un gradient de pression partielle décroissant.

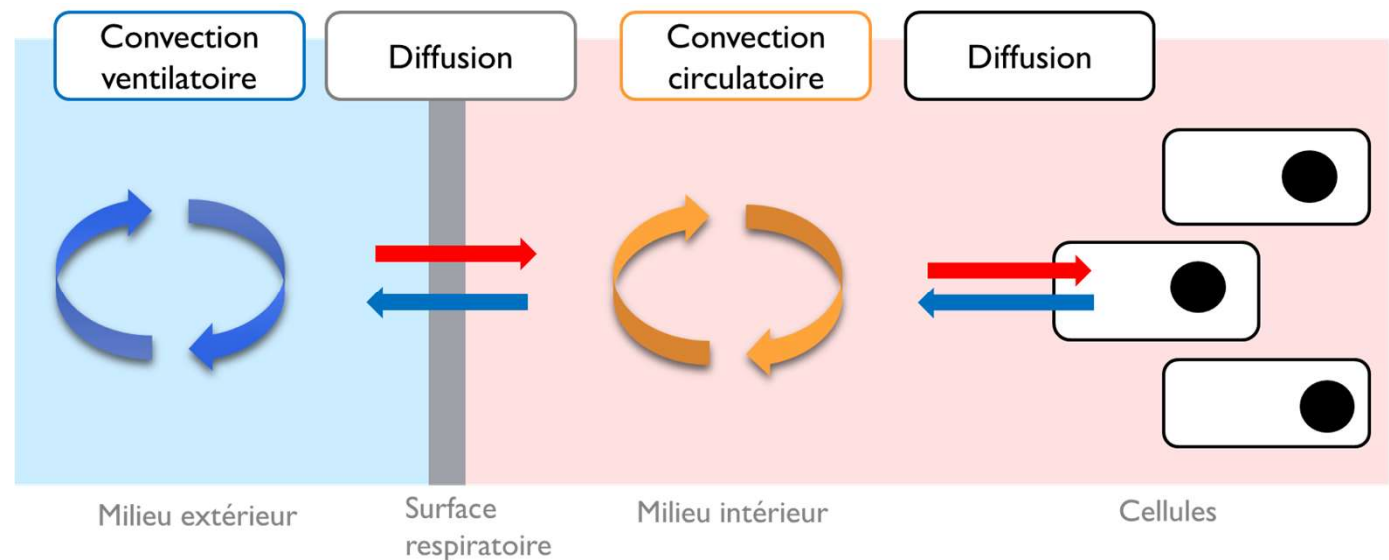
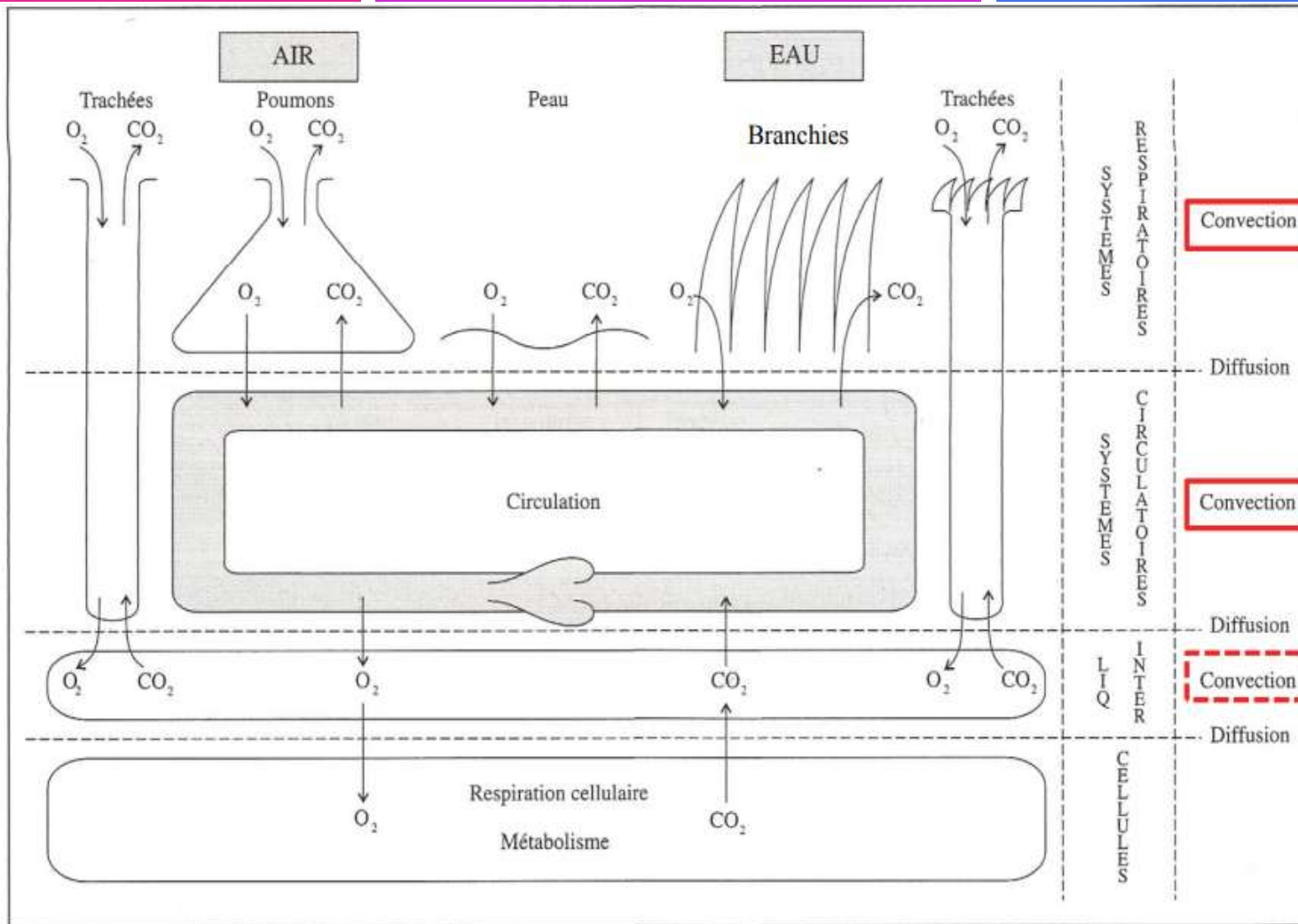


Figure 1 : Grandes étapes de la respiration chez les Bilatériens



La convection du liquide interstitiel est discutable

Figure 2: Diffusion et convection dans la fonction respiratoire Vision synthétique proposée par GILLES et al. (2006), modifié

I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES



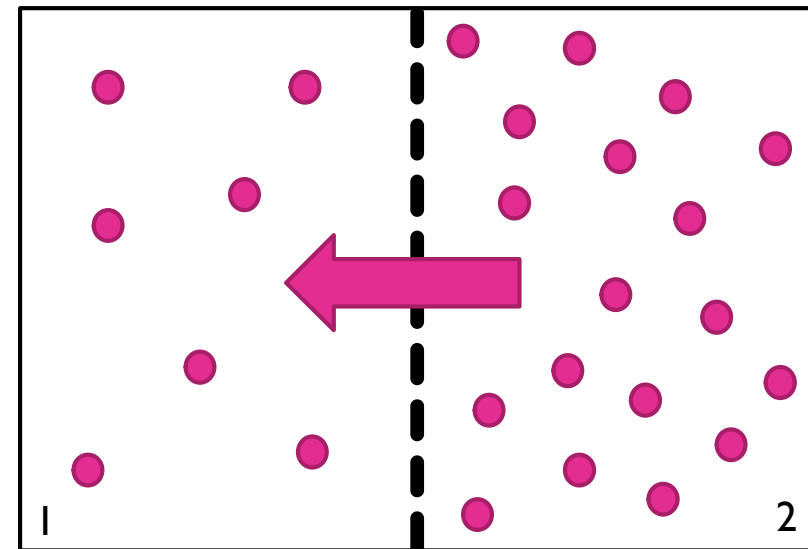
2. Loi de diffusion de gaz : première loi de Fick

La diffusion passive de gaz à travers une membrane suit la loi de Fick

Rôle de la ventilation et du renouvellement sanguin

$$J = -D \cdot S \cdot \left(\frac{\Delta P}{e}\right)$$

Bien maîtriser
les unités



J = flux de gaz ou débit de diffusion ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$) ou vitesse de diffusion du gaz

S = surface d'échanges (m^2)

D (ou K) = constante de diffusibilité de Krogh du gaz ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

ΔP = différence de pression partielle entre les deux compartiments (Pa)

e = épaisseur de la surface d'échange (m)

Dépendant du milieu de vie

I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES



2. Loi de diffusion de gaz : première loi de Fick

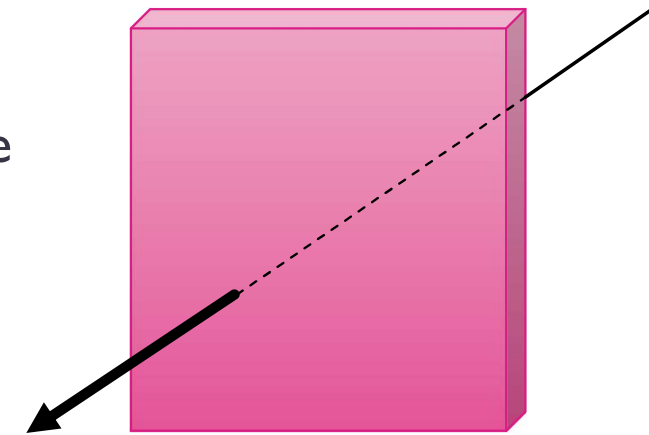
Le flux de diffusion sera optimisé par:

- **S** : une grande surface d'échange
- **e** : une petite épaisseur
- **ΔP** : une différence importante de pression partielle entre les deux compartiments
- **K** : un gaz passant facilement au travers des tissus

Structure de la surface d'échange

Convection ventilatoire et milieu de vie

Milieu de vie



$$J = -S.K.\left(\frac{\Delta P}{e}\right)$$

I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES



2. Loi de diffusion de gaz : première loi de Fick

Afin de comparer les milieux → notion de **pression partielle**:

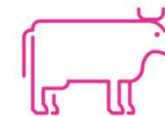
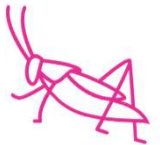
- Loi de Dalton :

$$P_i = x_i \cdot P_{total}$$

- P_i : pression partielle du gaz i (Pa ou mmHg)
- x_i : Proportion de molécules de gaz i sur l'ensemble des molécules de gaz
- P_{total} : pression totale (Pa ou mmHg)

- Pression atmosphérique: 1 atmosphère = 1,013 bar = 1013 hPa = 760 mmHg
- Pression partielle d'un gaz dans un liquide (eau, milieu intérieur): pression qui s'établit à l'équilibre avec celle du gaz surmontant la solution
- ⇒ $P_{O_2 \text{ air}} = 0,21 \cdot 760 \text{ mmHg} = P_{O_2 \text{ eau}} = 160 \text{ mmHg}$
- ⇒ $P_{CO_2 \text{ air}} = 440 \text{ ppm} \cdot 760 \text{ mmHg} = 0,044 \cdot 760 = 0,3 \text{ mmHg} = P_{CO_2 \text{ eau}}$

P_{O_2} dans
l'air sec?



$P_{O_2} = 21 \times 760 / 100$
 $P_{O_2} = 160 \text{ mmHg}$

I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES



2. Loi de diffusion de gaz : première loi de Fick

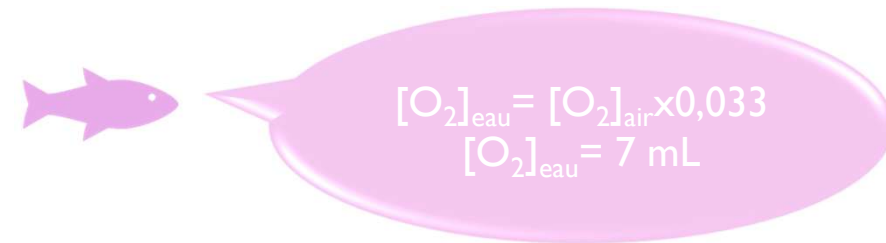
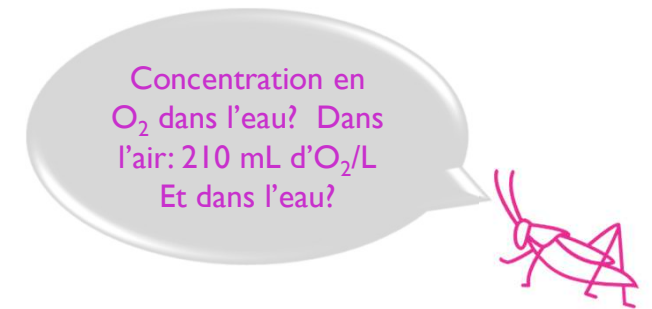
- Afin de comparer les milieux (aérien vs aquatique) → notion de **concentration d'un gaz qui dépend de deux facteurs** :
 - Pression partielle du gaz dans le liquide (même que dans milieu aérien en équilibre)
 - Solubilité du gaz dans le liquide: facteur k (constante de Henry) qui dépend du gaz et de la température (solubilité du gaz ↘ quand T°C ↗)

- Loi de Henry :

$$C_i = k_i \cdot P_i$$

- ✓ P_i : pression partielle du gaz i (Pa ou mmHg)
- ✓ C_i : concentration du gaz i (mol.L⁻¹)
- ✓ k_i : constante de Henry (mol.L⁻¹.Pa⁻¹)

- ⇒ **O₂ 30 fois plus concentré dans l'air que dans l'eau car O₂ beaucoup plus soluble dans air que dans eau**



I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CIMIQUES

A. TRANSPORTS DE GAZ ET LOIS PHYSICO-CHIMIQUES

2. Loi de diffusion de gaz : première loi de Fick



Loi de Boyle-Mariotte nécessaire à la compréhension de la mécanique ventilatoire

$$P_1 \cdot V_1 = \text{cste à } T^\circ\text{C cste}$$

- Si \nearrow volume alvéolaire
 \Rightarrow \searrow pression alvéolaire

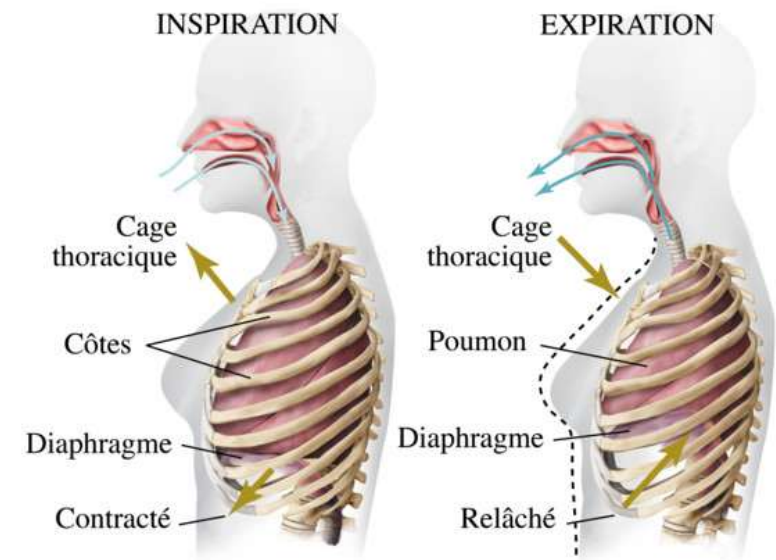
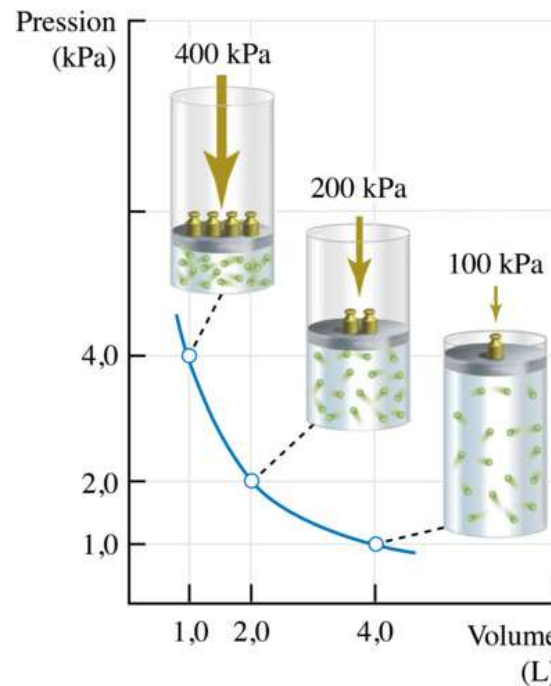


Figure 3 : la relation entre la pression et le volume (loi de Boyle-Mariotte)

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

I. LES ÉCHANGES GAZEUX SONT RÉGIS PAR DES LOIS PHYSICO-CHEMIQUES

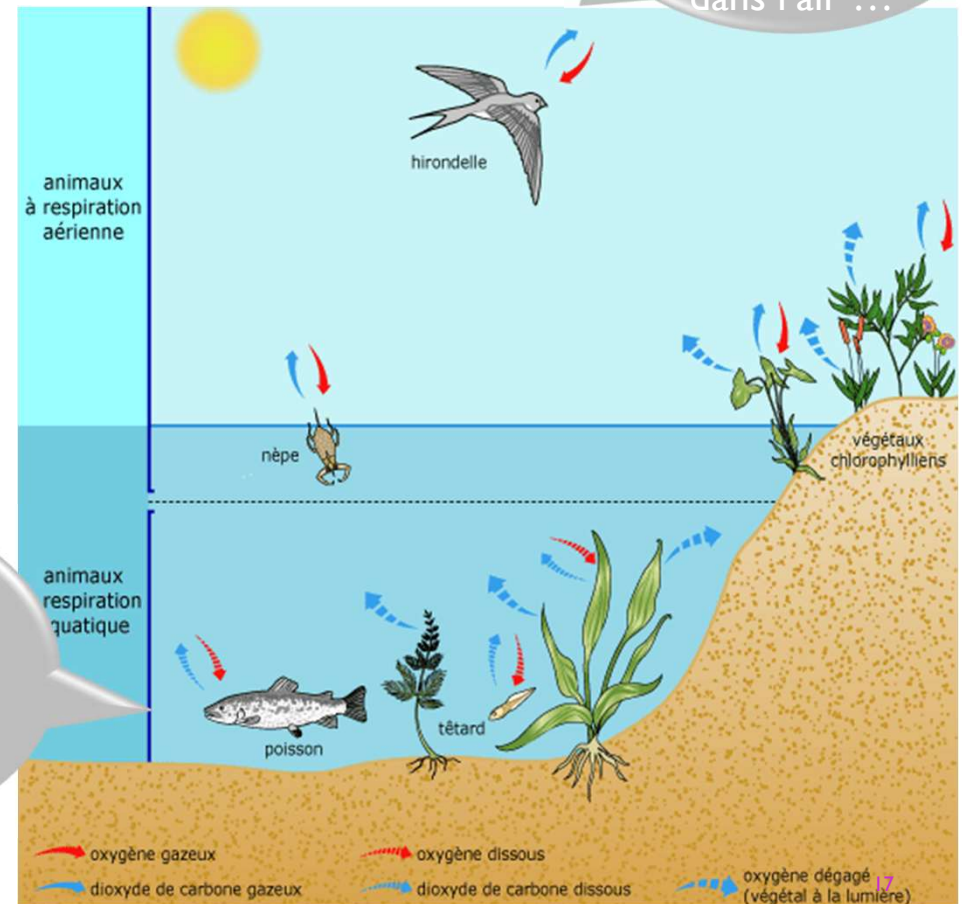
B. CONTRAINTES DU MILIEU DE VIE : COMPARAISON DU MILIEU AÉRIEN ET AQUATIQUE

Pas de poussée
d'Archimède,
températures
fluctuantes ...
c'est dur la vie
dans l'air ...



- Milieu aérien:
 - peu porteur
 - grandes fluctuations thermiques
 - $[O_2] = 210 \text{ mL/L}$
- Milieu aquatique:
 - porteur
 - Faibles fluctuations thermiques
 - $[O_2] = 7 \text{ mL/L}$

Fluctuat nec
mergitur!
Fallait rester
dans l'eau !



B. CONTRAINTES DU MILIEU DE VIE : COMPARAISON DU MILIEU AÉRIEN ET AQUATIQUE



I. Caractéristiques du milieu aérien

- La pression atmosphérique diminue avec l'altitude
 - A 0 m, $P_{atm} = 760$ mmHg
- La pression de vapeur d'eau augmente avec la température
 - A 0°C , $P_{H_2O} = 4,6$ mmHg
 - A 37°C , $P_{H_2O} = 47$ mmHg (6,2% du volume d'air)

Nom du gaz	% dans l'air
Diazote (N_2)	78
Dioxygène (O_2)	21
Argon (Ar)	0,93
Dioxyde de carbone (CO_2)	0,040
Autres gaz rares	0,03

Tableau 1 : Concentration des gaz de l'air

B. CONTRAINTES DU MILIEU DE VIE : COMPARAISON DU MILIEU AÉRIEN ET AQUATIQUE



2. Paramètres des milieux aériens et aquatiques

	Masse volumique (kg/L)	Viscosité (10 ⁻³ Pa s)	K _{O₂} cste de diffusibilité (mol.s ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻¹)	K _{CO₂} cste de diffusibilité (mol.s ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻¹)	β _{O₂} Capacitance (mol.L ⁻¹ .Pa ⁻¹)	β _{CO₂} Capacitance (mol.L ⁻¹ .Pa ⁻¹)	Volume d'O ₂ dans 1 L
Air	1.10 ⁻³	0,02	7,8.10 ⁻⁹	6,2.10 ⁻⁹	4,1.10 ⁻⁷	4,1.10 ⁻⁷	210 mL/L
Eau de mer	1	1	3,4.10 ⁻¹⁴	7,0.10 ⁻¹³	1,4.10 ⁻⁸	3,9.10 ⁻⁷	7 mL/L
Rapport eau/air	1000	50	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	1/30	1	1/30

Capacitance = capacité à contenir un fluide, rapport entre la variation de sa concentration et la variation de sa pression partielle. La capacitance est la capacité d'un milieu à contenir un gaz dissous en fonction de sa pression partielle : $\beta x = \Delta c x / \Delta P x$. Le coefficient de capacitance est fonction de la température, mais aussi, dans un milieu aqueux, de sa salinité.

Tableau 2 : Comparaison des propriétés de l'air et l'eau de mer concernant les gaz respiratoires

- Eau de mer 1000 fois plus dense et 50 fois plus visqueuse que air ⇒ ventilation bcp plus grande dans eau que dans air pour extraire même quantité d'O₂
- O₂ peu soluble dans l'eau
- CO₂ plus soluble que O₂ dans l'eau
- Eau peu concentrée en O₂

1L air à 15°C Patm= 760 mmHg (loi des gaz parfaits)	
PO ₂ air= 160 mmHg VolO ₂ air= 210 mL/L (21%)	PCO ₂ air= 0,3 mmHg VolCO ₂ air= 0,4 mL/L
↑ équilibre ↓	
PO ₂ eau= 160 mmHg VolO ₂ eau= 7 mL/L car kO ₂ faible O ₂ 30 fois moins concentré dans eau que dans air milieu pauvre en O₂	PCO ₂ eau= 0,3 mmHg VolCO ₂ eau= 0,4 mL/L car kCO ₂ plus soluble que O ₂ Autant de CO ₂ dans air que dans eau Milieu riche en CO₂ 1L eau

B. CONTRAINTES DU MILIEU DE VIE : COMPARAISON DU MILIEU AÉRIEN ET AQUATIQUE

3. Comparaison eau de mer-eau douce



La solubilité
d'un gaz diminue
avec l'↑ de
température

Température (°C)	0	15	30
Eau douce	10,3	7,2	5,6
Eau de mer	8	5,8	4,5

Tableau 3 : Volume d'O₂ dissous dans l'eau en fonction de la salinité et de la température (mg/L)

La concentration en gaz dissous est plus importante :

- Dans une eau douce
- Dans une eau froide
- Dans une eau agitée (convection)



BILAN...

Les eaux les plus poissonneuses sont:

- Douces
 - Froides
 - Agitées
- ... donc rivières de montagne!



BILAN – ECHANGE DE GAZ EN MILIEU AÉRIEN ET AQUATIQUE



Air

- Milieu desséchant
- Milieu peu porteur
- Peu visqueux et peu dense
- Diffusion rapide des gaz
- Concentration en O_2 élevée

Eau

- Milieu humide non desséchant
- Milieu porteur
- Plus visqueux et plus dense
- Diffusion lente des gaz
- Concentration en O_2 faible

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien
- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien
- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation
- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires
- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

A. CAS DE SURFACES NON SPÉCIALISÉES

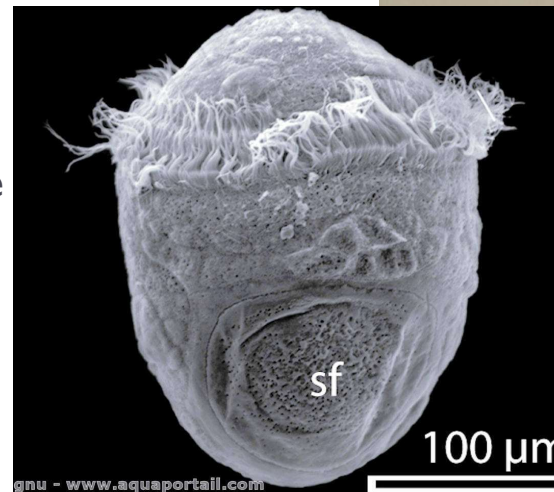


- Les organismes **unicellulaires** paramécies
 - ⇒ échanges gazeux respiratoires à travers la membrane plasmique = **diffusion simple** selon le **gradient de pression**
- Dans le cas des organismes pluricellulaires
 - **diamètre < 2mm pour diffusion du dioxygène** de la périphérie vers le centre (ex : les larves planctoniques d'annélides, de mollusques ou d'arthropodes par exemple).



Paramécie au MO

1 μm



Larve trochophore d'annélide au MEB

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

B. STRUCTURES RESPIRATOIRES TÉGUMENTAIRES

- Une diversité :
 - De milieu de vie
 - De taille
- Point commun :
 - **tégument humide**
- **Tégument:** interface **non spécialisée** dans la fonction respiratoire



Truite arc-en-ciel



Hydre d'eau douce



Anguille



Lombric



Salamandre sans poumon



Grenouille verte

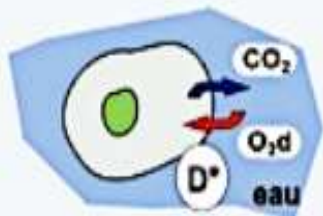
II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

B. STRUCTURES RESPIRATOIRES TÉGUMENTAIRES



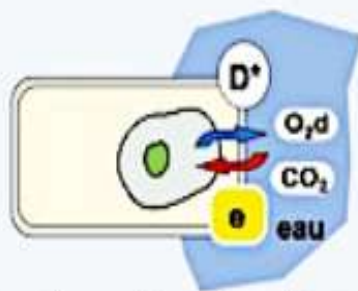
LOI DE FICK $F = -K \cdot \Delta P \cdot S / e$

échanges gazeux directs
entre chaque cellule
et son environnement

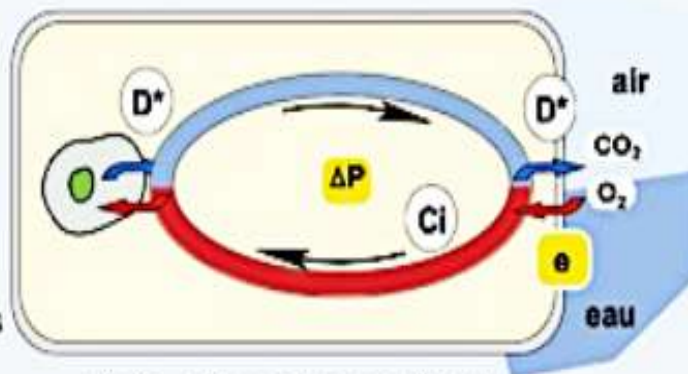


unicellulaires,
diblastiques

respiration tégumentaire



planaires, métazoaires dépourvus
d'appareil circulatoire



néreïs, métazoaires possédant
un appareil circulatoire

ÉCHANGEURS NON SPÉCIALISÉS

- ⇒ Tégument fin
- ⇒ Perméable
- ⇒ Milieu riche en eau
- ⇒ Activité métabolique réduite

Figure 4 : échangeurs non spécialisés (Dunod 2021)

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

B. STRUCTURES RESPIRATOIRES TÉGUMENTAIRES



Après la pluie, les
Lombrics se
retrouvent en surface



1. Leurs galeries souterraines sont immergées, ils se noient
 2. L'air de surface plus riche en O_2 que sous terre, n'est accessible qu'en cas de pluie pour les Lombrics autrement déssechement épidermique
 3. Les lombrics adorent regarder les nuages
- Vers de terre = lombric (métazoaires bilatériens): cellules épidermiques et celles de l'épithélium digestif → **échanges directs** de gaz avec atmosphère du sol
- ✓ **épiderme ou tégument = échangeur respiratoire**, non spécialisé, entre lymphe interstitielle et environnement.

Le lombric: un métazoaire bilatérien à vie aérienne et à respiration tégumentaire

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

B. STRUCTURES RESPIRATOIRES TÉGUMENTAIRES

- Néréis (annélide polychète aquatique): **parapodes** = extension du tégument.
 - Chaque métamère porte latéralement une paire de **parapodes à rôle locomoteur et respiratoire**.
 - pas d'échangeur respiratoire spécialisé = **respiration tégumentaire**.

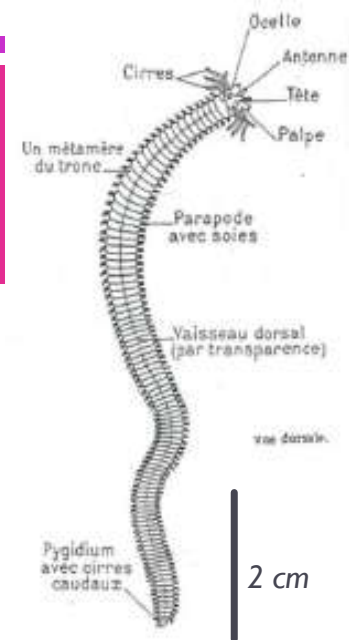
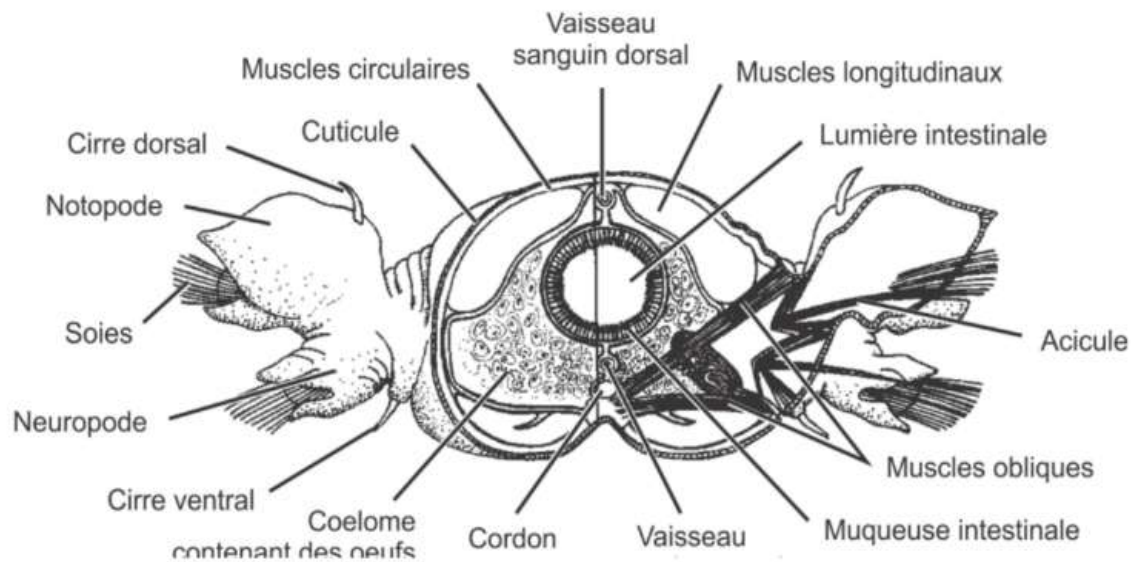
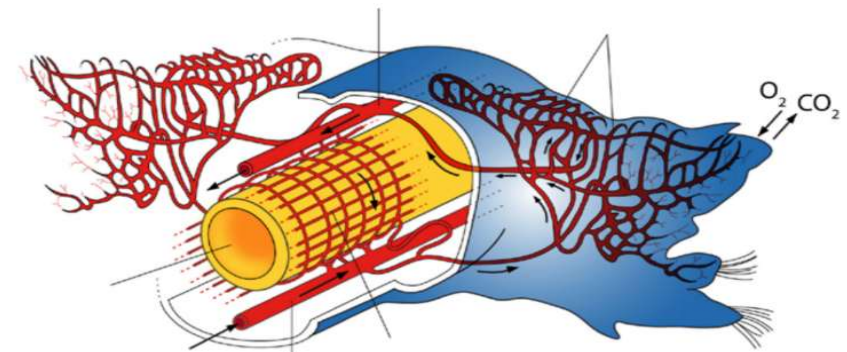


Figure 5 : rôle des parapodes dans la respiration de la néréis (<http://adamoliverbrown.com/> ; <https://www.zoologie-uclouvain.be/>)



Le néréis: un métazoaire bilatérien à vie aquatique et à respiration tégumentaire

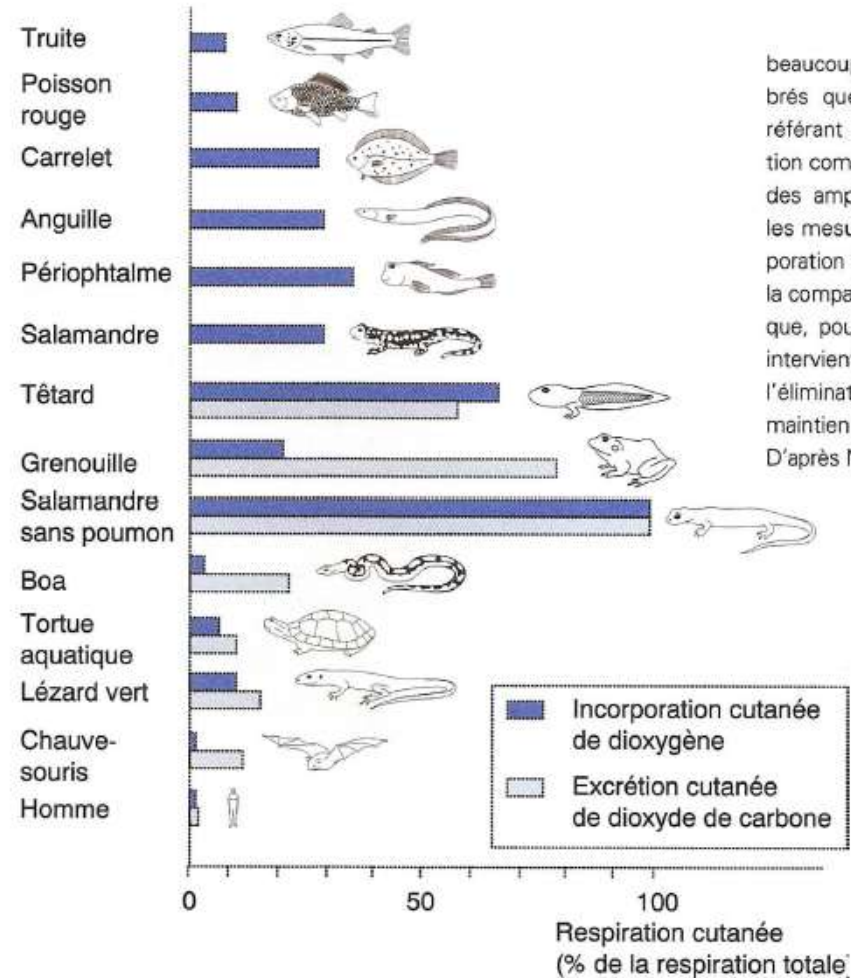
II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

B. STRUCTURES RESPIRATOIRES TÉGUMENTAIRES



Grenouille du lac Titicaca (*Telmatobius culeus*)

- Bilan : La respiration tégumentaire
 - Peut être associée à d'autres types respiratoires
 - Est associée à une **humidification du tégument** (dissolution des gaz et solubilisation des gaz)
 - ne permet d'assurer la totalité des besoins respiratoires que si :
 - ✓ la taille de l'animal est assez faible
 - ✓ le rapport surface tégumentaire/volume de l'animal est élevé
 - ✓ l'activité est réduite



La respiration cutanée est beaucoup plus fréquente chez les Vertébrés que l'on peut l'imaginer, en se référant à l'épaisseur et à la structuration complexe des téguments, la classe des amphibiens mise à part. Lorsque les mesures de rejet de CO₂ et d'incorporation d'O₂ peuvent être effectuées, la comparaison de ces valeurs montrent que, pour une même espèce, la peau intervient de façon prépondérante dans l'élimination du CO₂, en relation avec le maintien de l'équilibre acidobasique. D'après M. Feder et W. Burggren (1986).

Figure 6 : Part des échanges gazeux tégumentaires chez différents vertébrés (Richard, 1997)

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES



I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques

- **branchies** = évaginations de la surface corporelle en contact avec l'eau du milieu de vie
 - **spécialisées** dans les échanges de gaz respiratoires.
 - structures **externes** et **soutenues** par la poussée d'Archimède
 - **faible solubilité** de l' O_2 \Rightarrow apport d'eau important au contact de la surface d'échanges
 - viscosité de l'eau \Rightarrow apport d'eau coûteux en énergie



Branchie du requin-baleine (un chondrichtyen)



Larve d'éphémère et ses branchies latérales abdominales



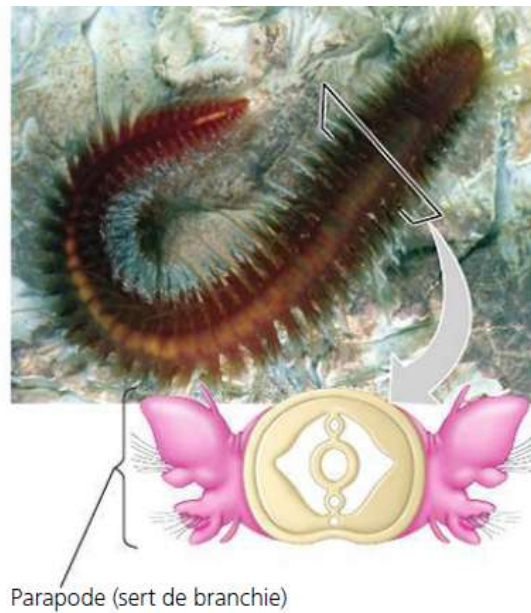
Branchies de l'axolotl (triton gardant des caractères larvaires à l'état adulte)

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

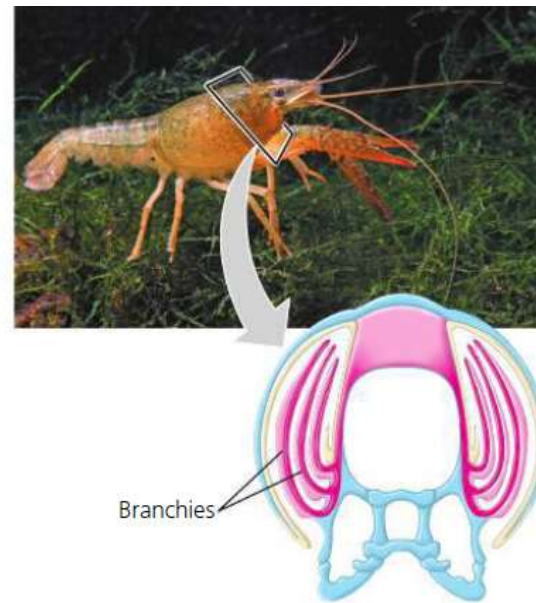
C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques

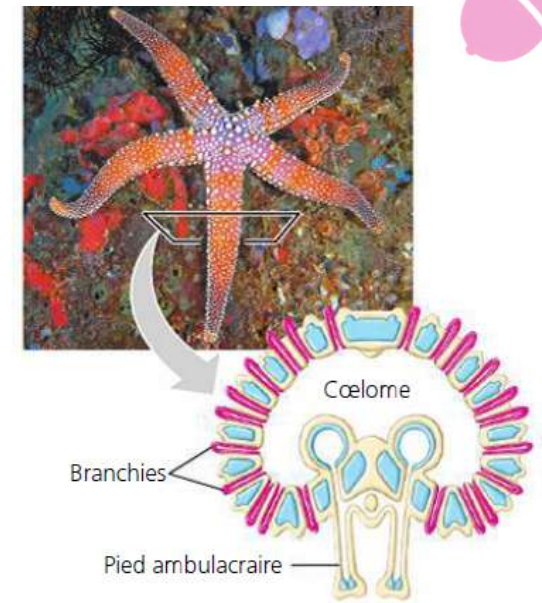
- Dans certains ouvrages : parapodes des polychètes (Annélides) = branchies, non protégées, mais permettant une circulation d'eau par les mouvements de l'animal
- écrevisse (crustacés) : **très fines branchies filamenteuses** (ou trichobranchies) sous l'exosquelette en **zone thoracique** (protégé de l'extérieur par la cuticule). ⇒ appendices spécialisés permettent la circulation d'eau à la surface des branchies
- étoile de mer : plusieurs branchies tubulaires creusées depuis la peau vers le coelome. Les mouvements de convection du coelome facilitent le flux d'eau au sein des branchies.



Polychète (ver)



Ecrevisse



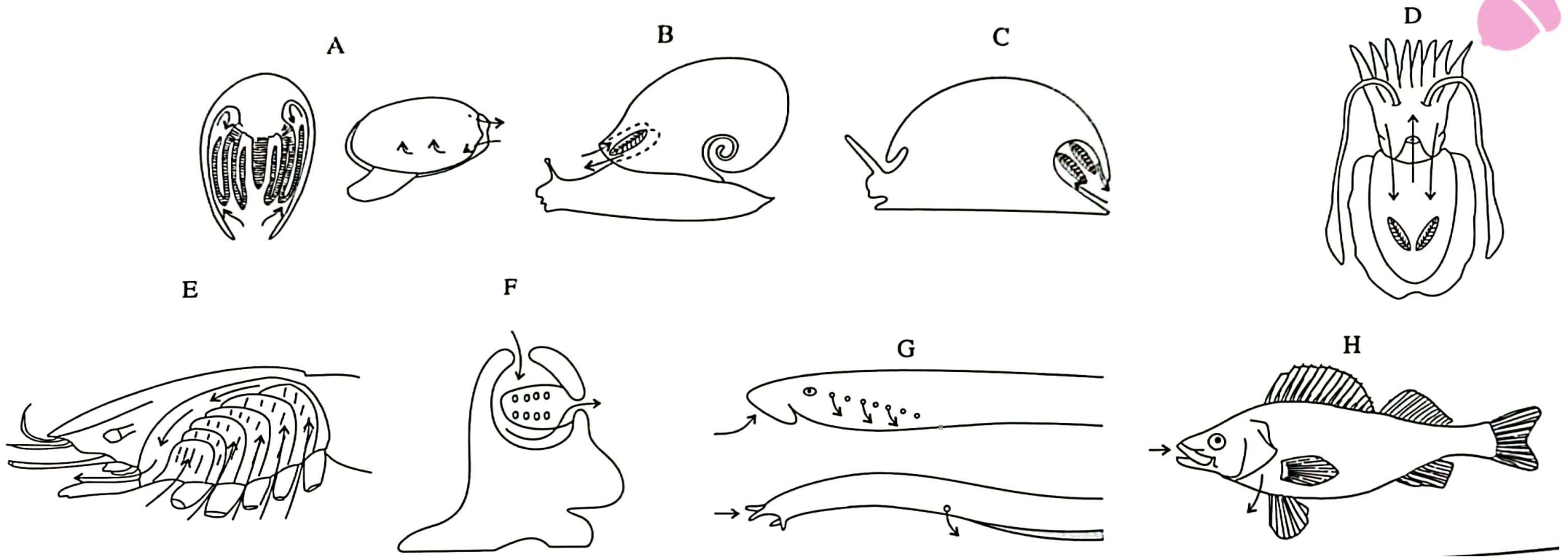
Etoile de mer

Figure 7 : Diversité des systèmes branchiaux chez trois espèces aquatiques (Campbell, 2012)

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques



Diversité des branchies internes, chez les mollusques lamellibranches (A), gastéropodes (B, C), céphalopodes (D), crustacés décapodes (E), tuniciers (F), agnates (G), téléostéens (H) (Gilles, 2007)

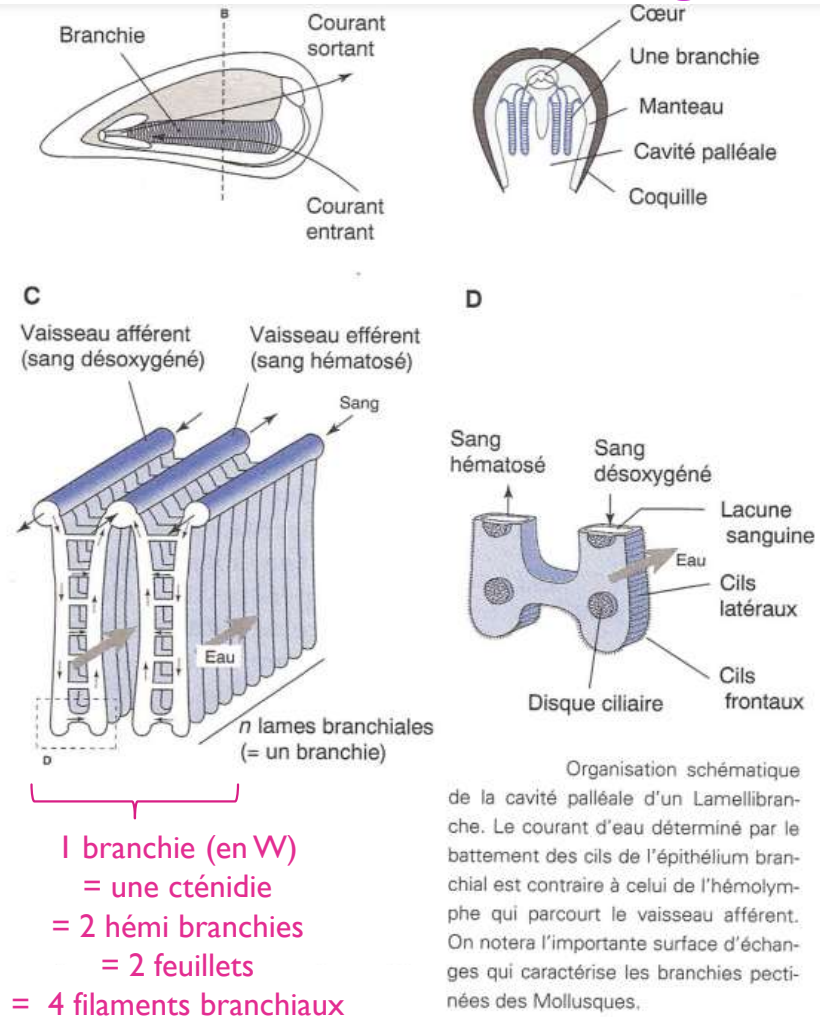
C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES



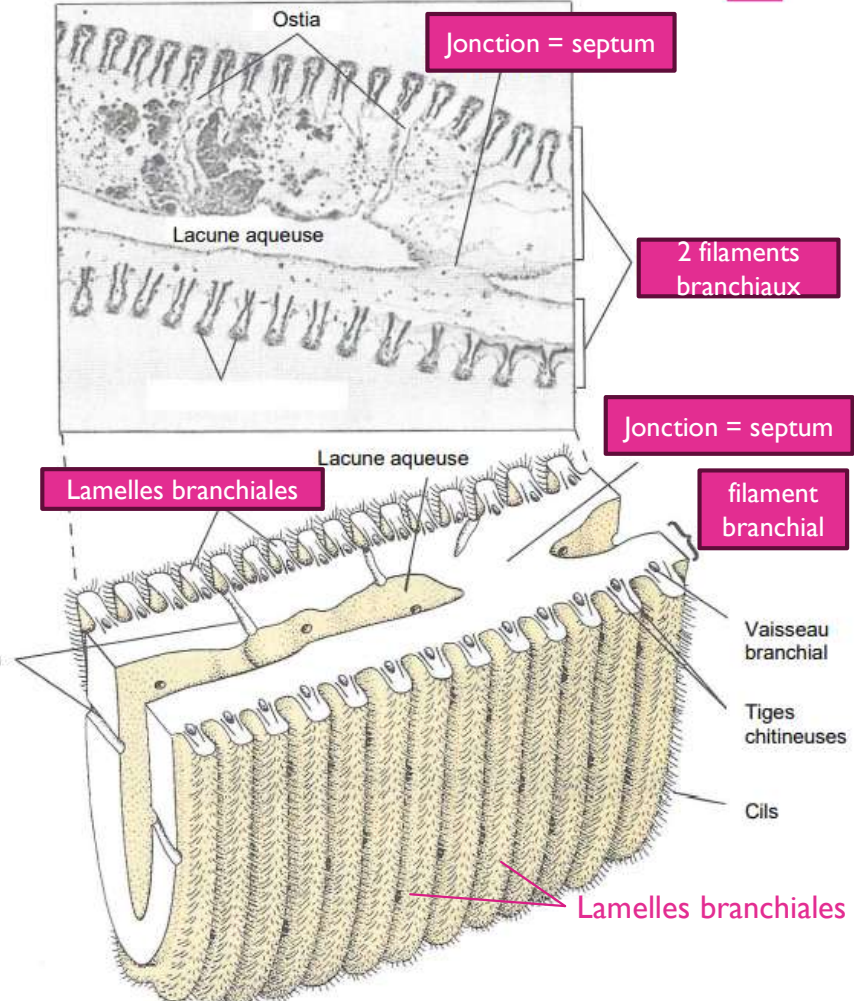
I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques

- une paire de branchies = **cténidies** (caractéristique des Mollusques)
- chaque branchie = **deux feuillets parallèles avec nombreuses lames**
- chaque feuillet = un **filament direct** (connecté au rachis) + **filament réfléchi**
- Filaments** associés par des **brosses ciliaires**
- Chaque filament : **cils latéraux** responsables du **courant d'eau**.
- échanges entre eau et **hémolymphe** circulant dans **lacunes** des filaments, via un **épithélium simple**.

Grande surface
Faible épaisseur

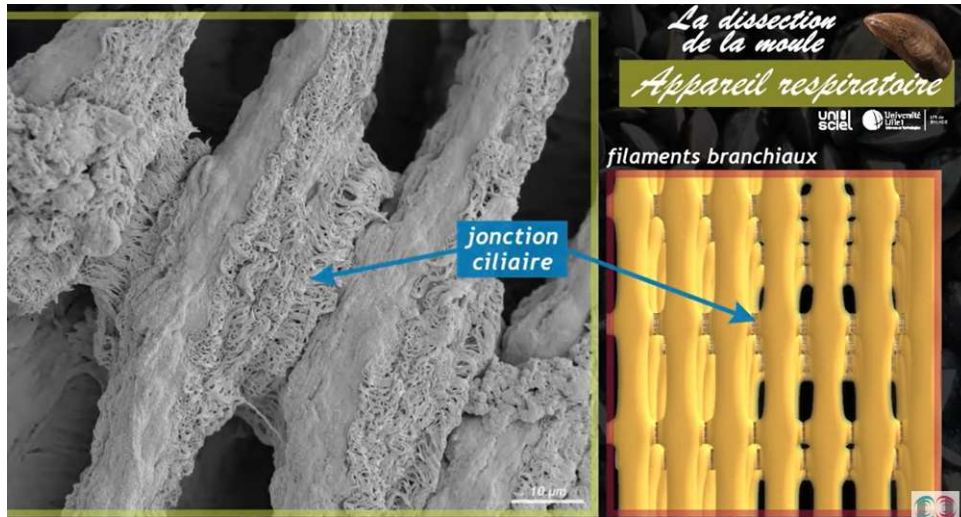
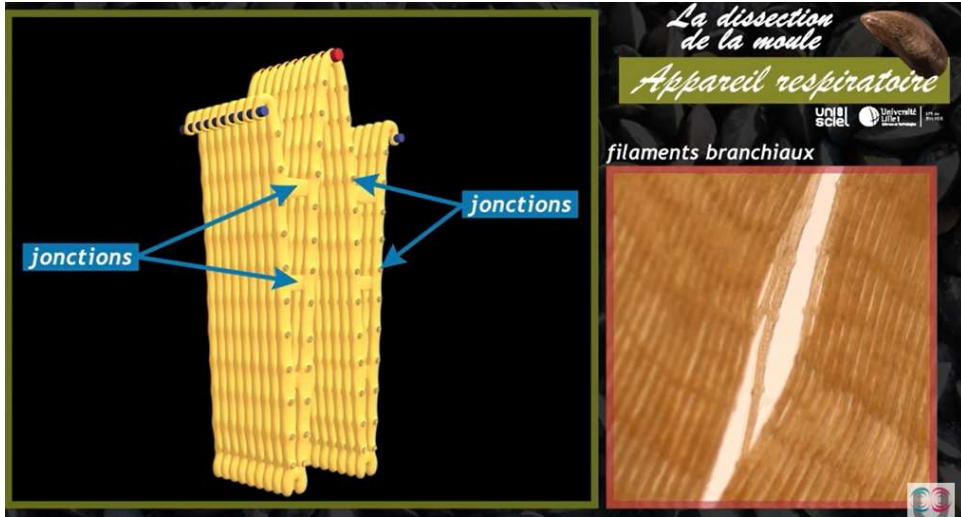


1 branchie (en W)
= une cténidie
= 2 héli branchies
= 2 feuillets
= 4 filaments branchiaux



Organisation d'une branchie (lame branchiale) de moule d'eau douce (Hickmann et Kats, 2006, adapté/traduit)

Figure 8 : la respiration de la Moule (d'après Richard et al., 1997)



Les jonctions ciliaires assurent la cohésion de la branchie

Epithélium unistratifié

Jonction ou septum

Jonction ciliaire

Un filament branchial

Lamelles branchiales

68 µm

Espace interfilament

Membrane basale

Lacune avec hémolymphe

Epithélium unistratifié

Jonction ciliaire

Cils latéraux

Vers le manteau palléal

Un filament branchial

22 µm

C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

1. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques

Cf TP dissection

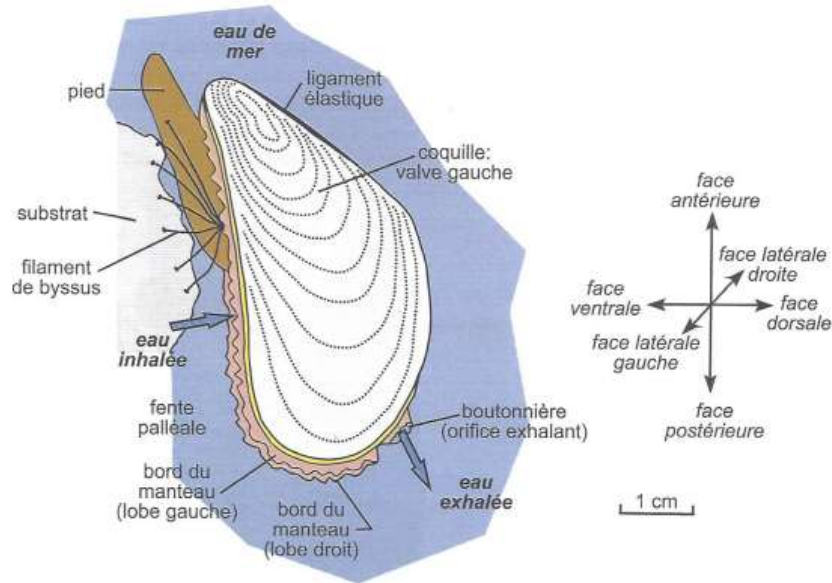


Figure 9 : La Moule, dans sa coquille est traversée par un flux d'eau unidirectionnel (Peycru et al., 2018)

1. ouverture de la coquille par **relâchement des muscles adducteurs** antérieurs et surtout postérieurs
2. Entrée d'eau par **face ventrale**
3. **Trajet unidirectionnel** au travers de **cavité palléale** par fente palléale (délimitée par les bords du manteau)
4. Sortie d'eau par **boutonnière dorsale**

Trajet unidirectionnel
⇒ ΔP ↗

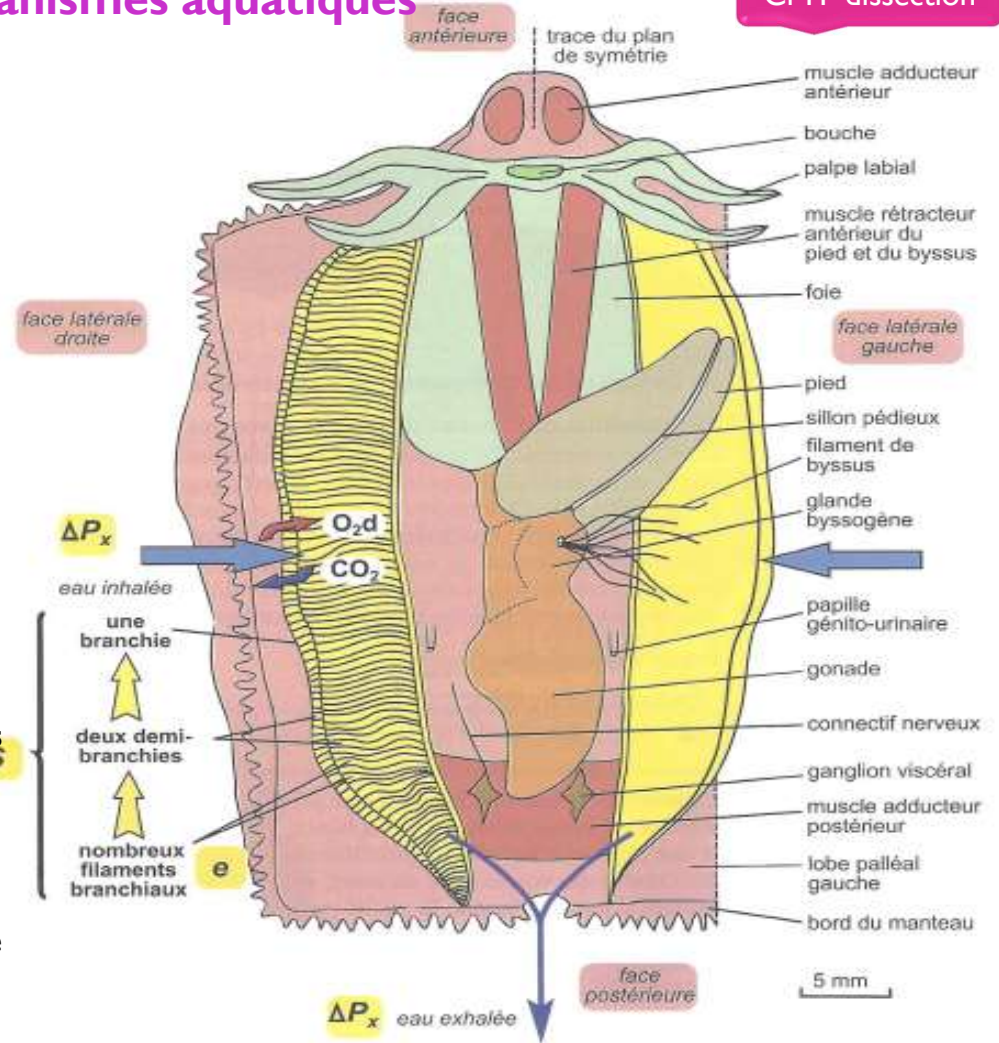
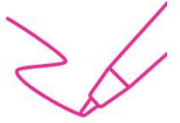
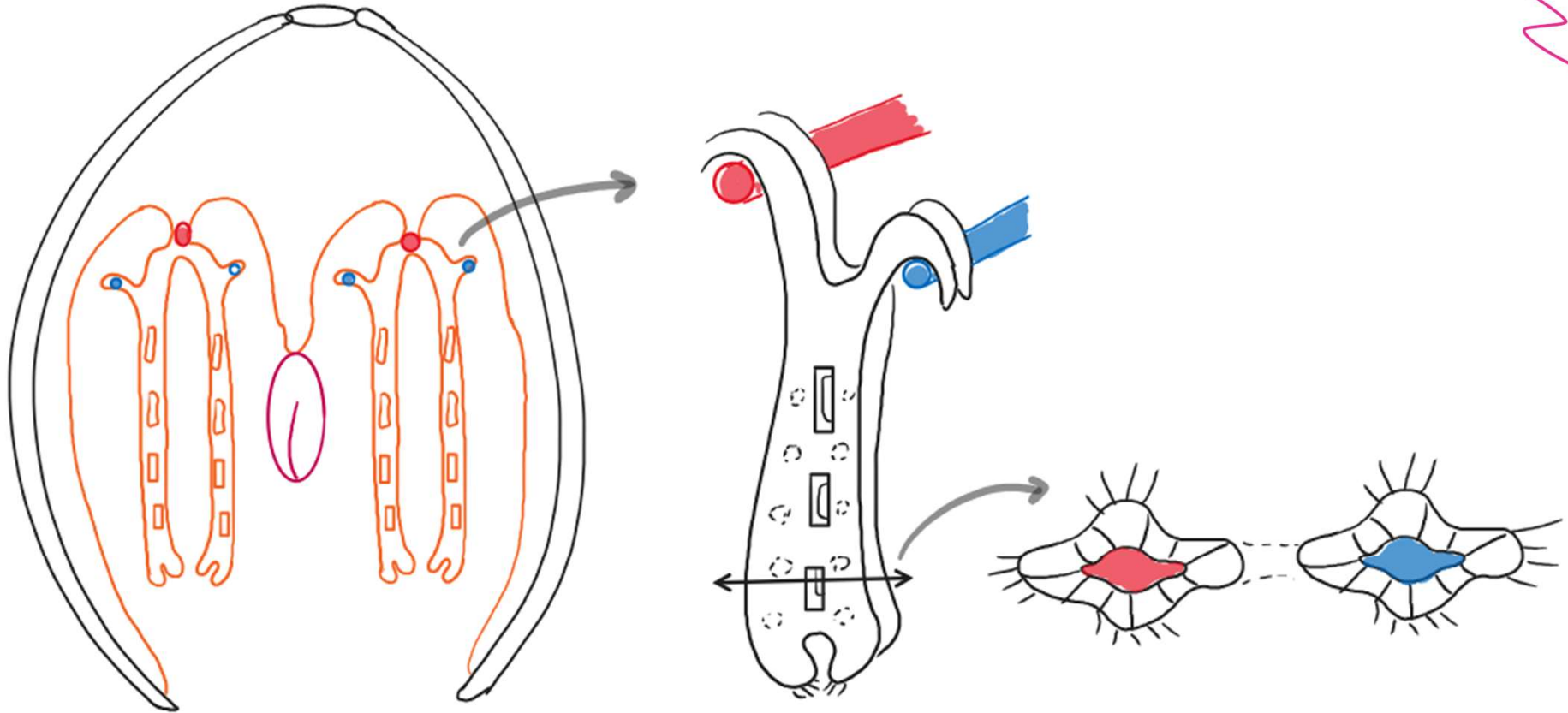
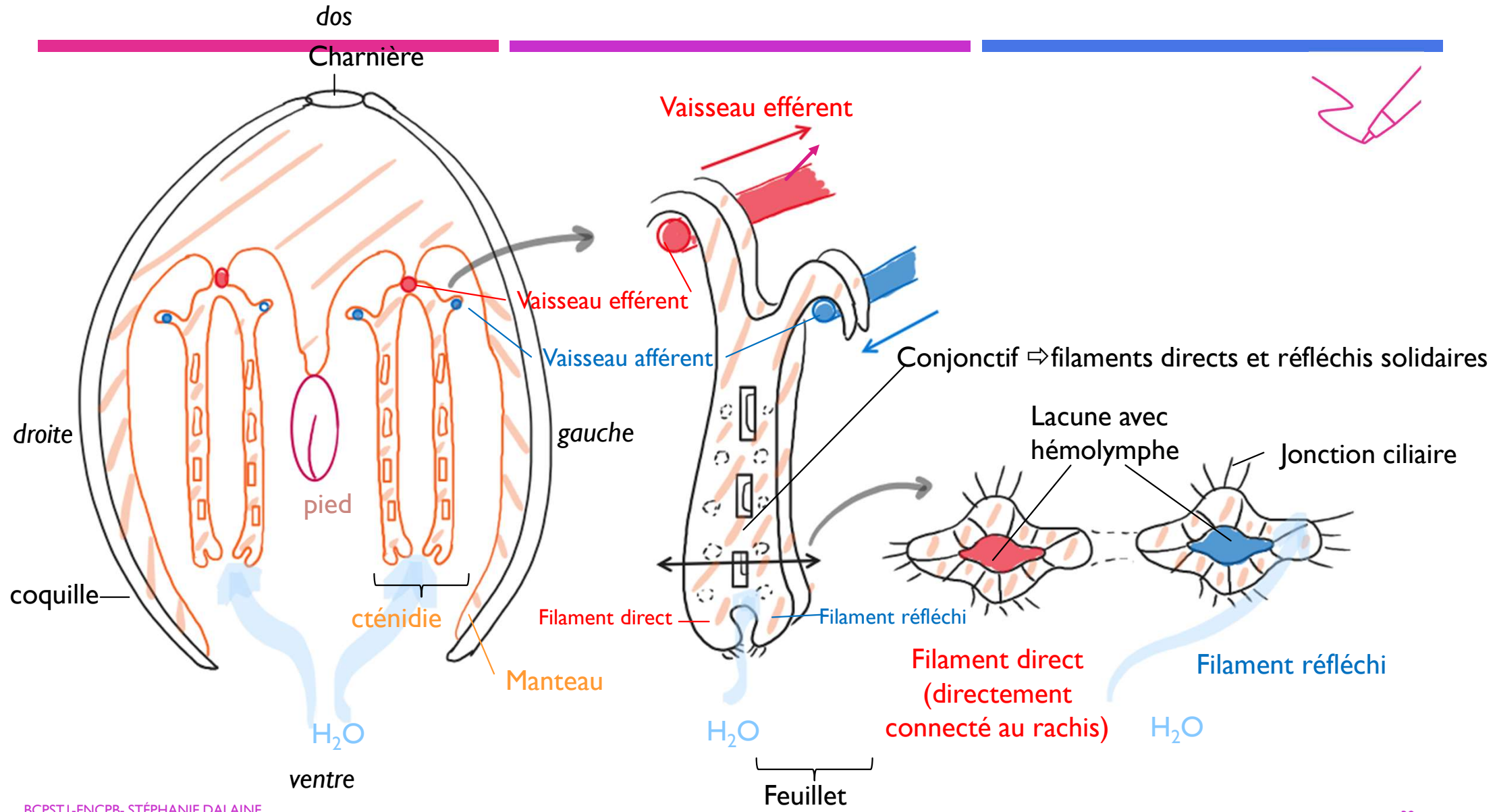


Figure 10 : moule disséquée (vue ventrale) avec mise en évidence du flux d'eau participant à la respiration (Peycru et al., 2018)





C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques

- **Opercule:** lame protégeant branchies
- **Ouïe** = orifice ouvrant sur cavité branchiale
- **4 arcs branchiaux** (chez les Téléostéens)
 - 2 holobranchies par arc
 - >10 lames (filaments) par holobranchie
 - > 50 lamelles branchiales par lame branchiale
- 14 m²/kg de poisson, soit, pour un (petit) thon d'environ 200kg, 2800m² de surface d'échange branchiale !

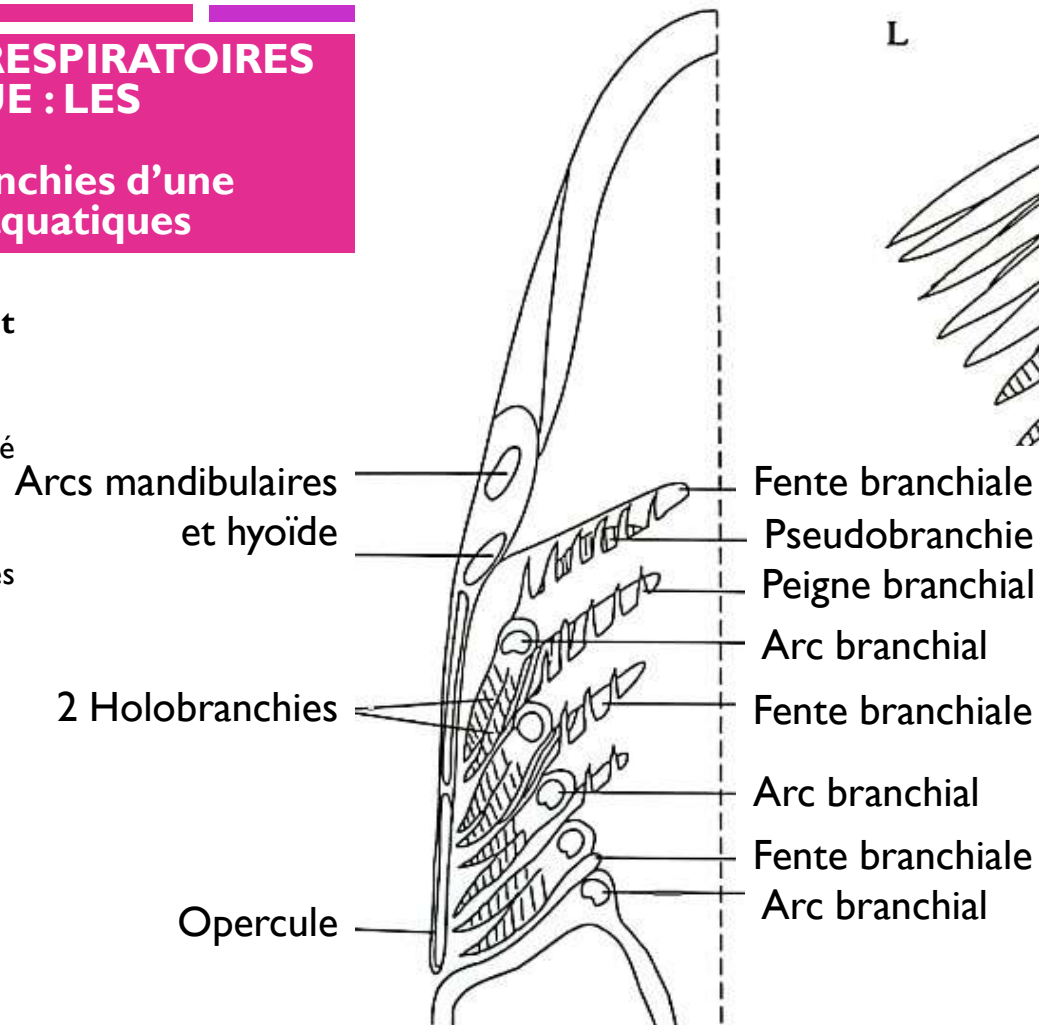
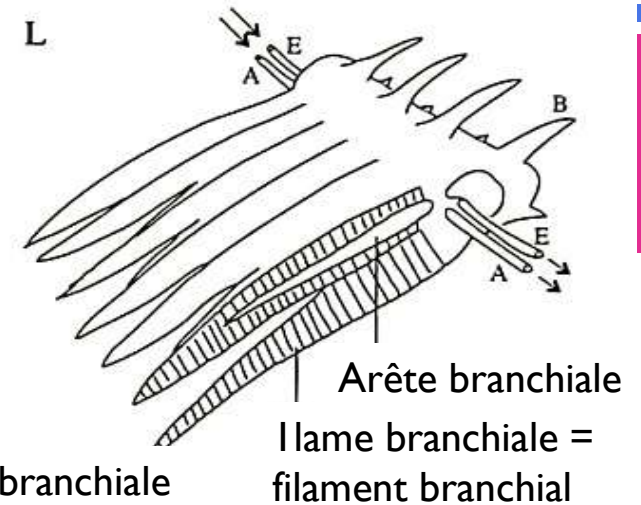


Figure 12 : Organisation des branchies des téléostéens (Gilles, 2007)



Observation de 3 arcs branchiaux d'une truite

C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques

- 2 holobranchies par arc branchial
- >10 lames branchiales (ou filaments branchiaux)/ holobranchie
- >50 lamelles branchiales/ lame branchiale (filament branchial)
- **Vaisseau afférent** interne / **efférent** externe
- Circulation d'eau **unidirectionnelle**
 - ➔ Surface d'échange importante
 - ➔ ΔP important
 - ➔ **Échange à contre-courant**

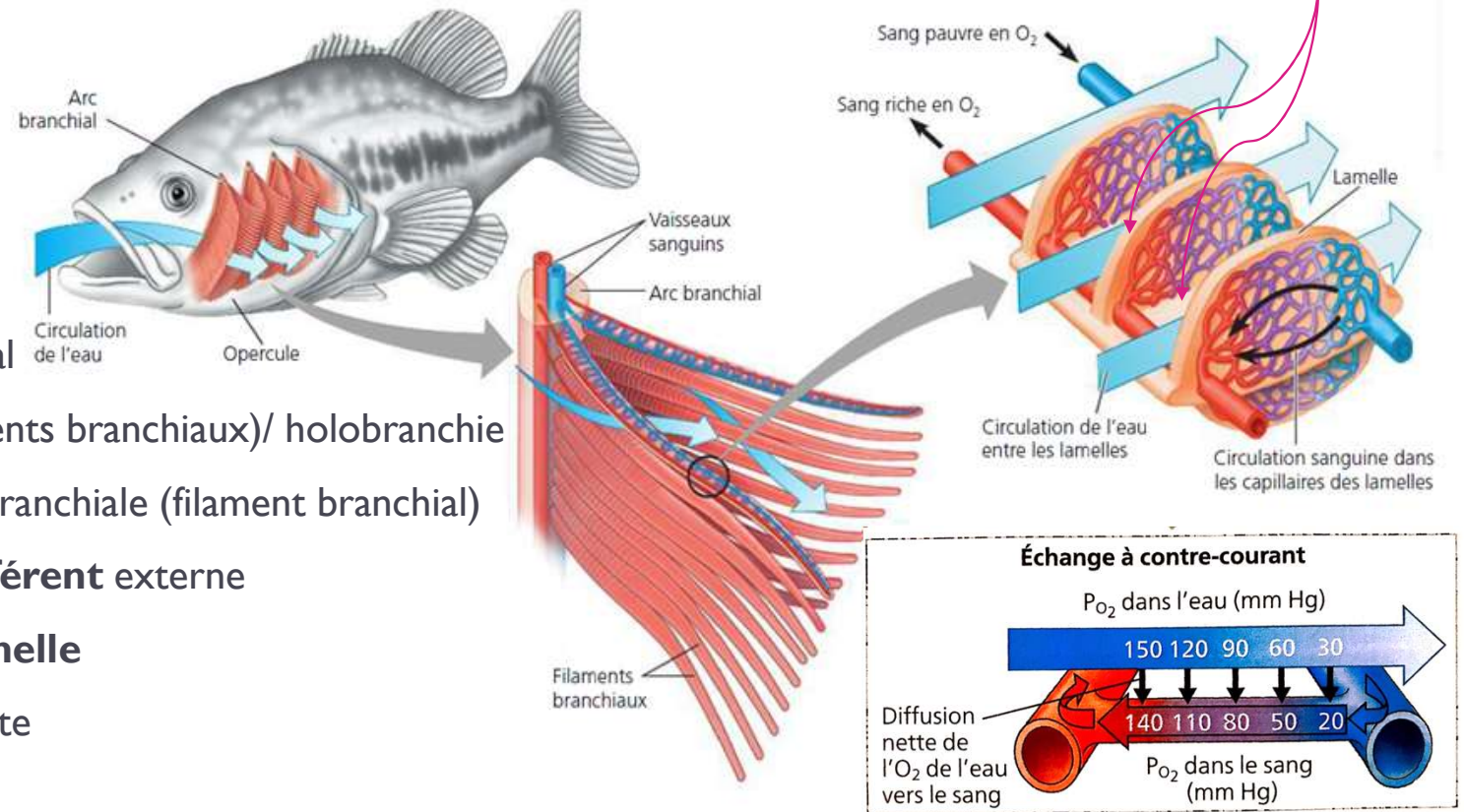


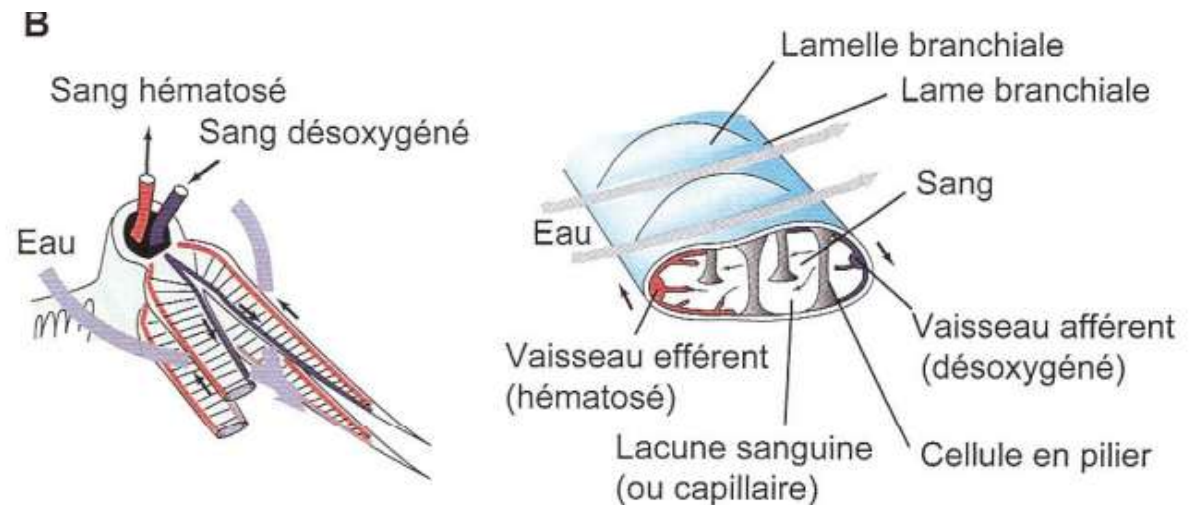
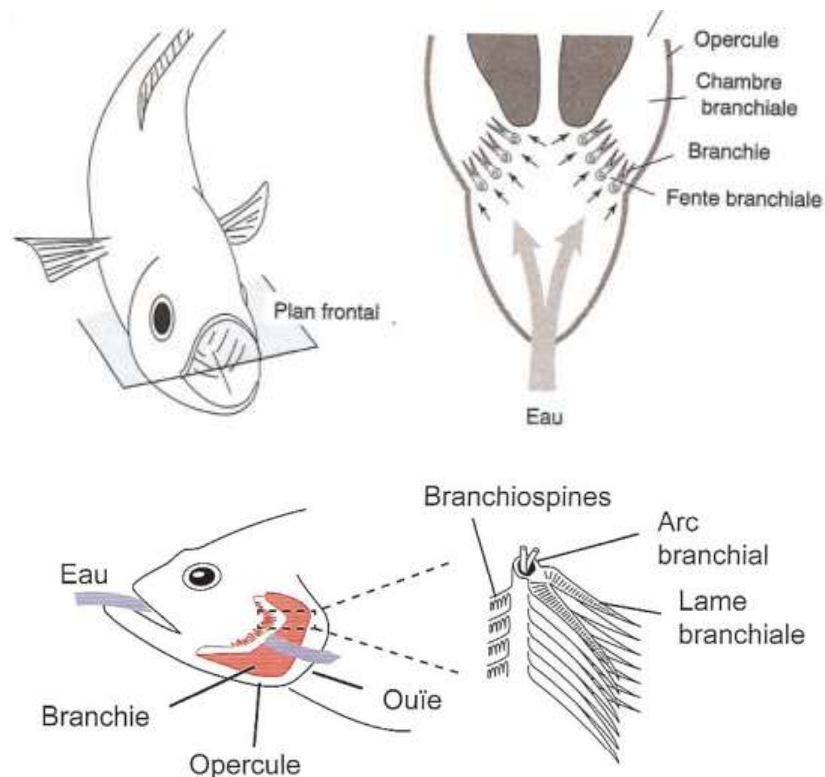
Figure 11 : Branchies des téléostéens (Campbell, 2012)

C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques



Deux cavités chez les téléostéens: une **cavité buccale** et **deux cavités operculaires**= **cavités branchiales**

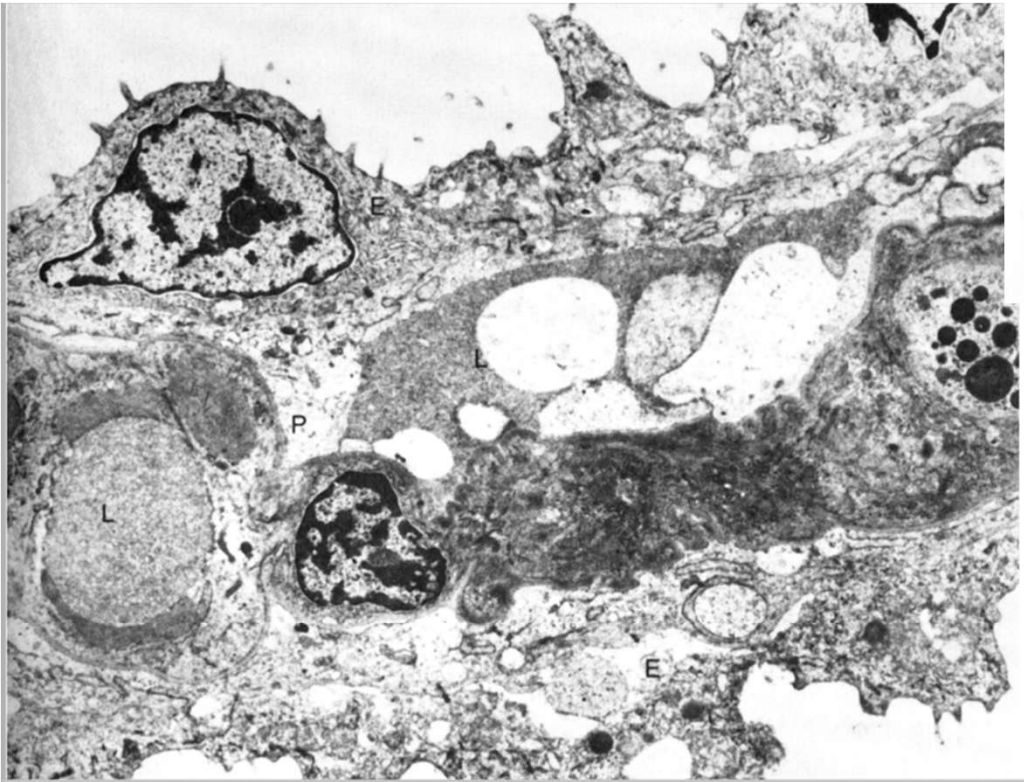


- L'épithélium des lames présente **des lacunes sanguines** lieu des échanges gazeux.
- Les cellules en pilier ou **cellules pilastres** maintiennent écartées les deux parois des vaisseaux sanguins.
- Les échanges gazeux se déroulent au sein des lacunes.

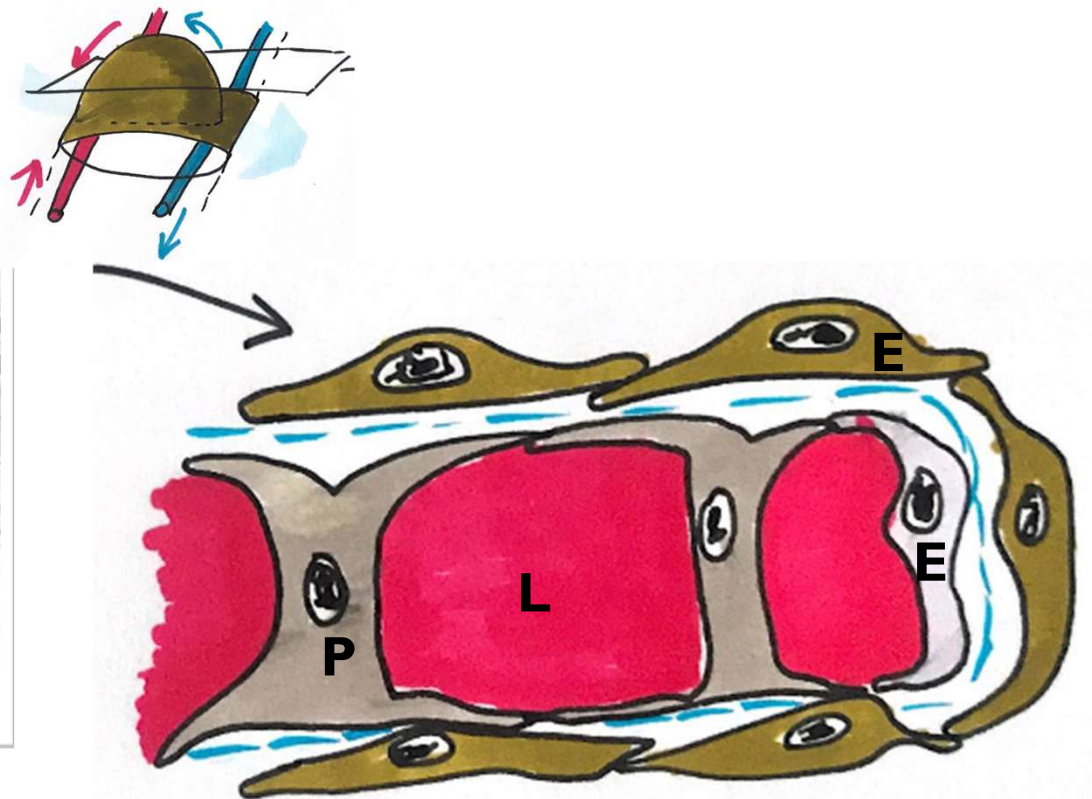
Respiration des Téléostéens D'après RICHARD et al. (1997)

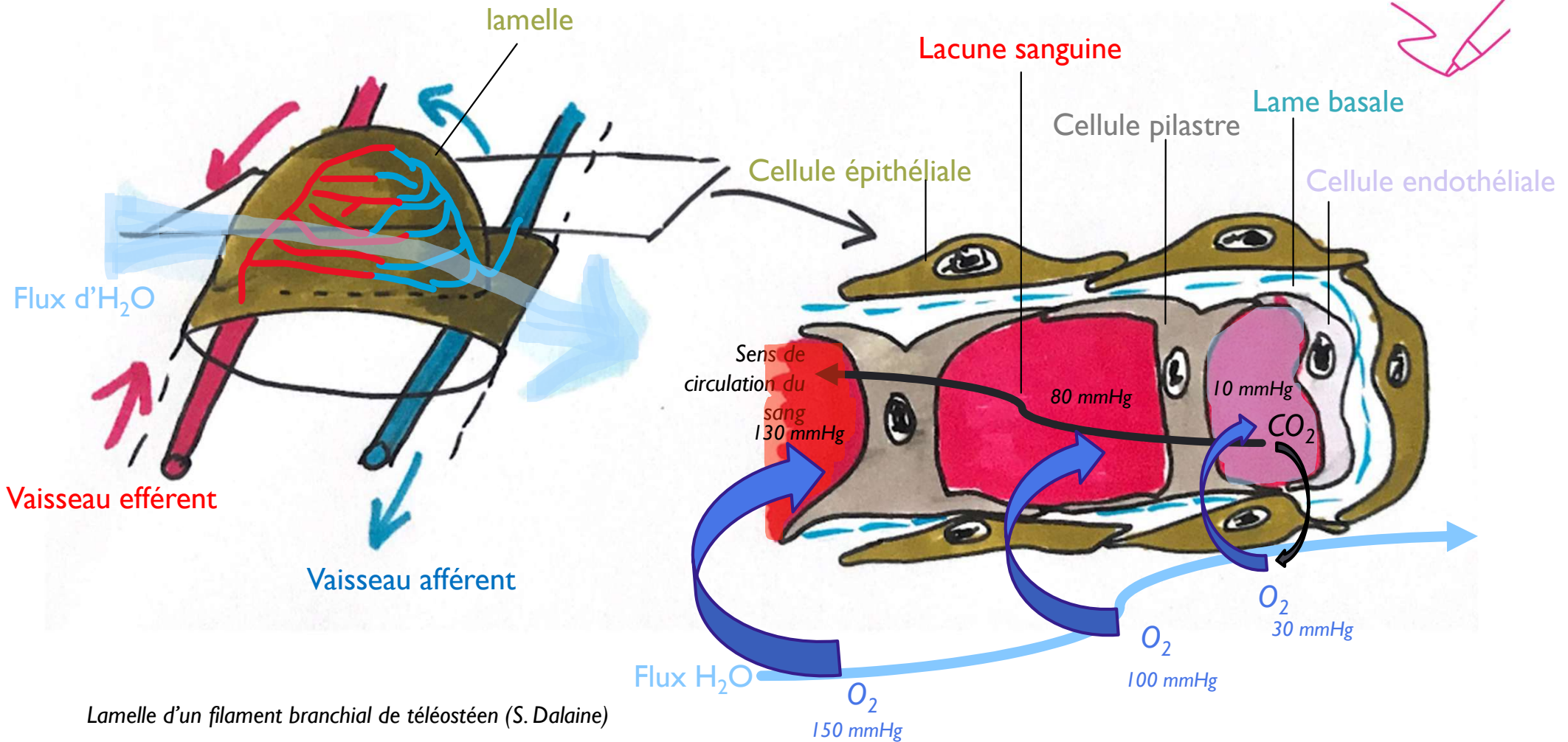
C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques



Source Bruno Anselme





Lamelle d'un filament branchial de téléostéen (S. Dalaine)

Coupe longitudinale d'une lamelle d'un filament branchial de téléostéen (S. Dalaine)

C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES

I. Observation de branchies d'une diversité d'organismes aquatiques

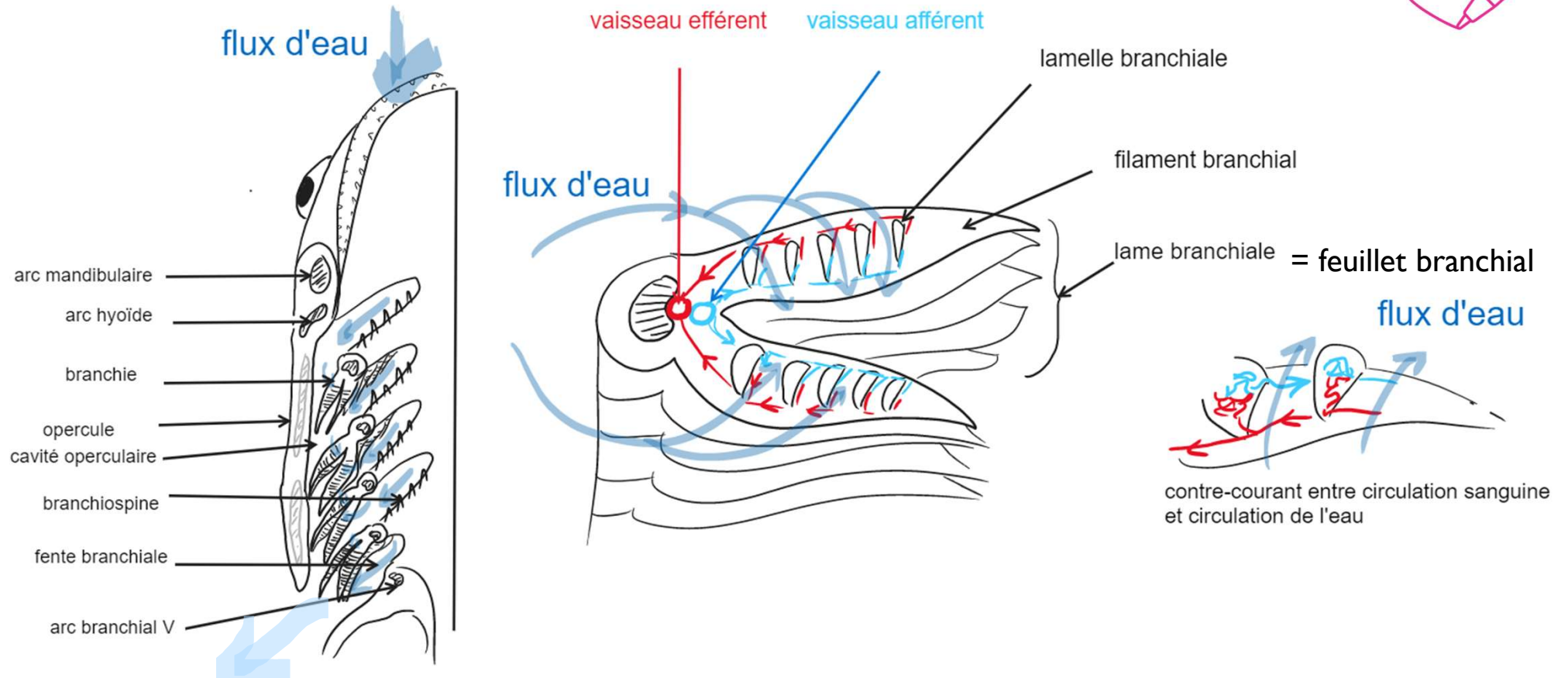


schéma bilan: la respiration des Téléostéens (S. Dalaine)



- 2 Feuilletts forment une cténidie (=branchie) en W
- Chaque feuillet: un filament direct vs un filament réfléchi
- Brosse ciliaire entre les filaments directs (resp.réfléchis)
- Pont conjonctif entre filament direct vs réfléchi
- **Filament direct: sang ascendant riche en O_2**
- **Filament réfléchi: sang descendant pauvre en O_2**



- 4 arcs branchiaux avec deux branchies /arc
- **Lame branchiale (=filament) structurée par cartilage**
- **Lamelles /lame**
- **Lacune /lamelle**
- **Vaisseau afférent, sang descendant pauvre en O_2 vers intérieur de la lame**
- **Vaisseau efférent ascendant oxygéné vers extérieur**

Aurélié Denis, BCPST Lycée Thiers, Marseille

ET LE DIPNEUSTE

Littéralement j'ai deux poumons
et oui, je cumule branchies et
poumons.
Je vis dans le bassin amazonie,
dans une eau chaude faiblement
agitée donc faiblement
concentrée en O_2



Dipneuste (sarcoptérygien), aquarium de la porte Dorée



*Dipneuste américain aspirant de l'air à la surface -
Lepidosiren paradoxa*
<https://www.aquarium-tropical.fr/collections-vivantes/lepidosiren-paradoxa>

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

C. LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AQUATIQUE : LES BRANCHIES



2. Bilan sur les branchies

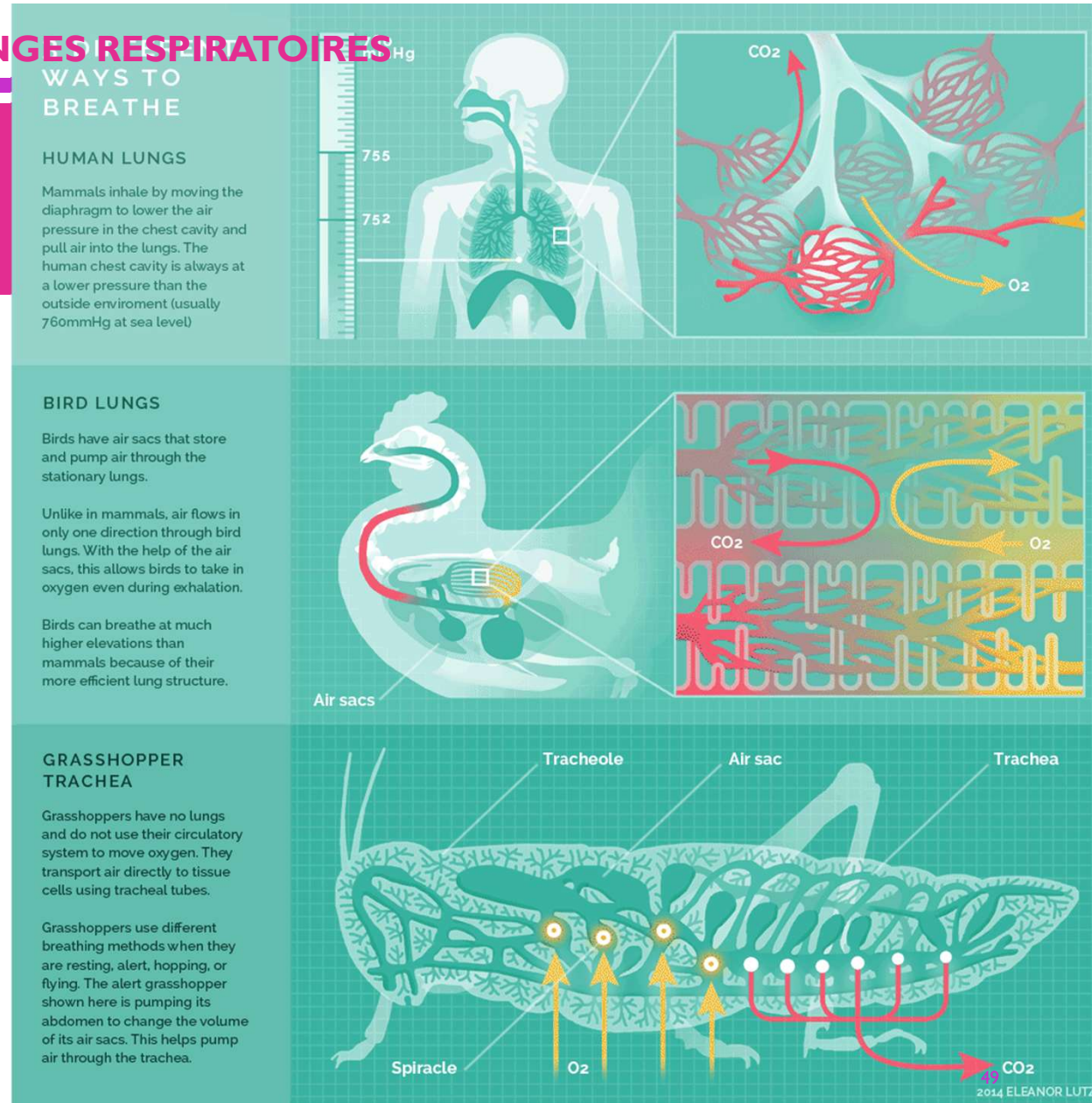
- **Diversité** structurale
- Souvent **protégées** (souples et fragiles)
- Surfaces évaginées (milieu porteur)
- **Flux d'eau unidirectionnel** (milieu visqueux, ΔP grand, cf loi de Fick)
- **Repliées** (S grand, cf loi de Fick)
- **Epaisseur** faible (e petit, cf Loi de Fick)

⇒ Des convergences évolutives (**efficacité de diffusion, grande surface évaginée**) permettant une respiration externe efficace malgré les contraintes du milieu aquatique (densité, viscosité, disponibilité en O_2)

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINÉES EN MILIEU AÉRIEN

- 1. Trachées des insectes
- 2. Parabronches des oiseaux
- 3. Poumons des mammifères



PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien
- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien
- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation
- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires
- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

I. Les trachées des insectes



- **trachées** = invaginations de la **cuticule** (rappel chitine: polymère d'N-acétylglucosamine)
 - 10 paires de **stigmates** (orifices)
 - Trachées = conduits ramifiés rigidifiés par des anneaux de cuticule (= **ténidies** ou taenidies)
 - ⇒ évite l'écrasement des conduits
- **cellules trachéolaires**: terminent les trachées, directement au contact des tissus
- Présence ou non de sacs aériens = stockage de l'air
- **Pas de système de convection** pour la distribution de l'air aux tissus

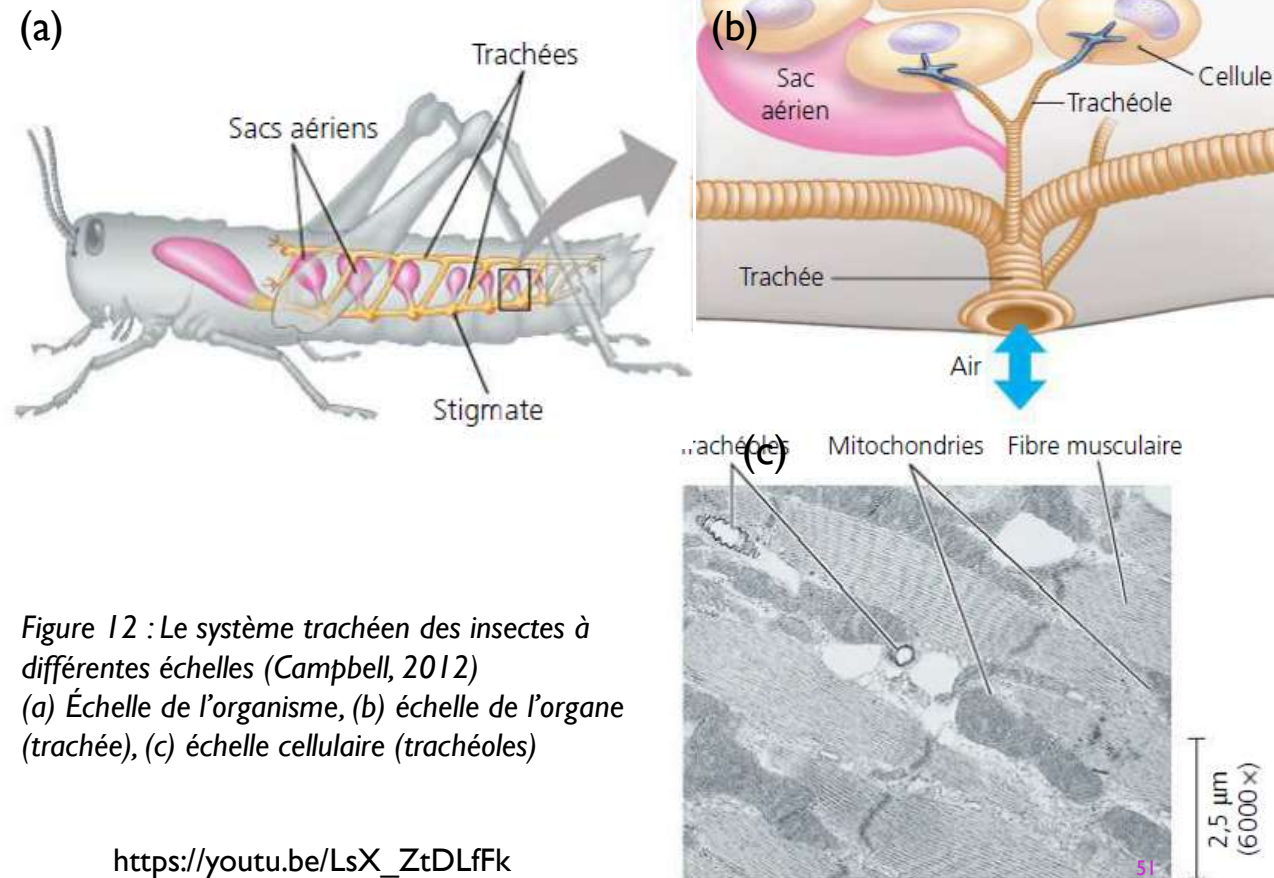
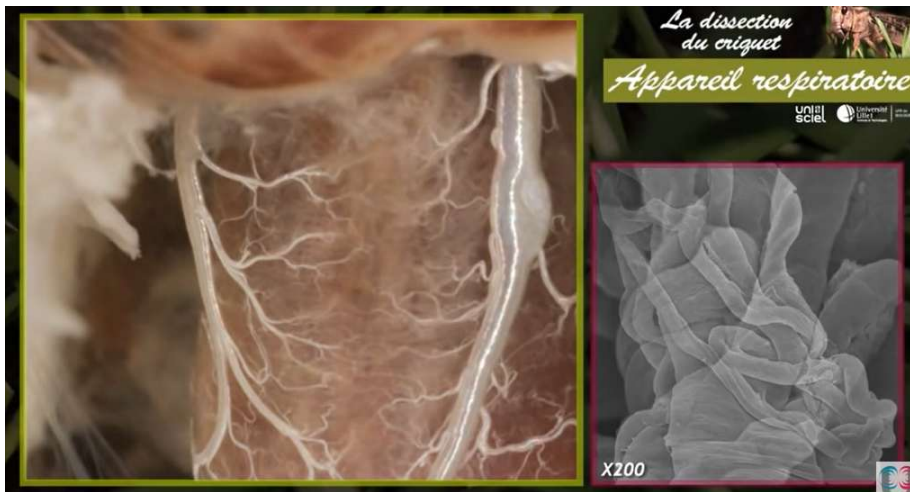
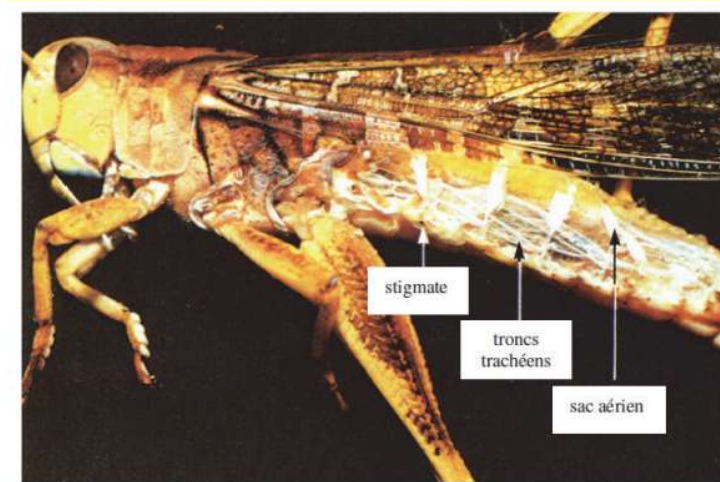


Figure 12 : Le système trachéen des insectes à différentes échelles (Campbell, 2012)
(a) Échelle de l'organisme, (b) échelle de l'organe (trachée), (c) échelle cellulaire (trachéoles)

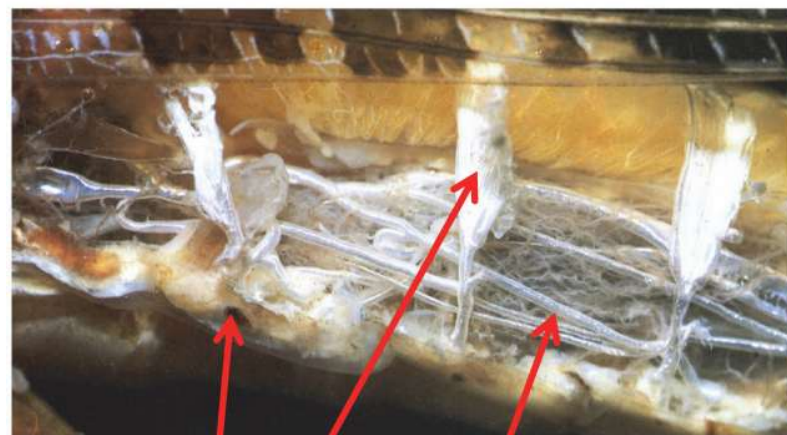
https://youtu.be/LsX_ZtDLfFk



« arbre » trachéen très ramifié



Stigmate et système trachéen



Stigmates, sacs aériens et trons trachéens longitudinaux

Sacs aériens = réserve d'air et réduction de la densité de l'animal

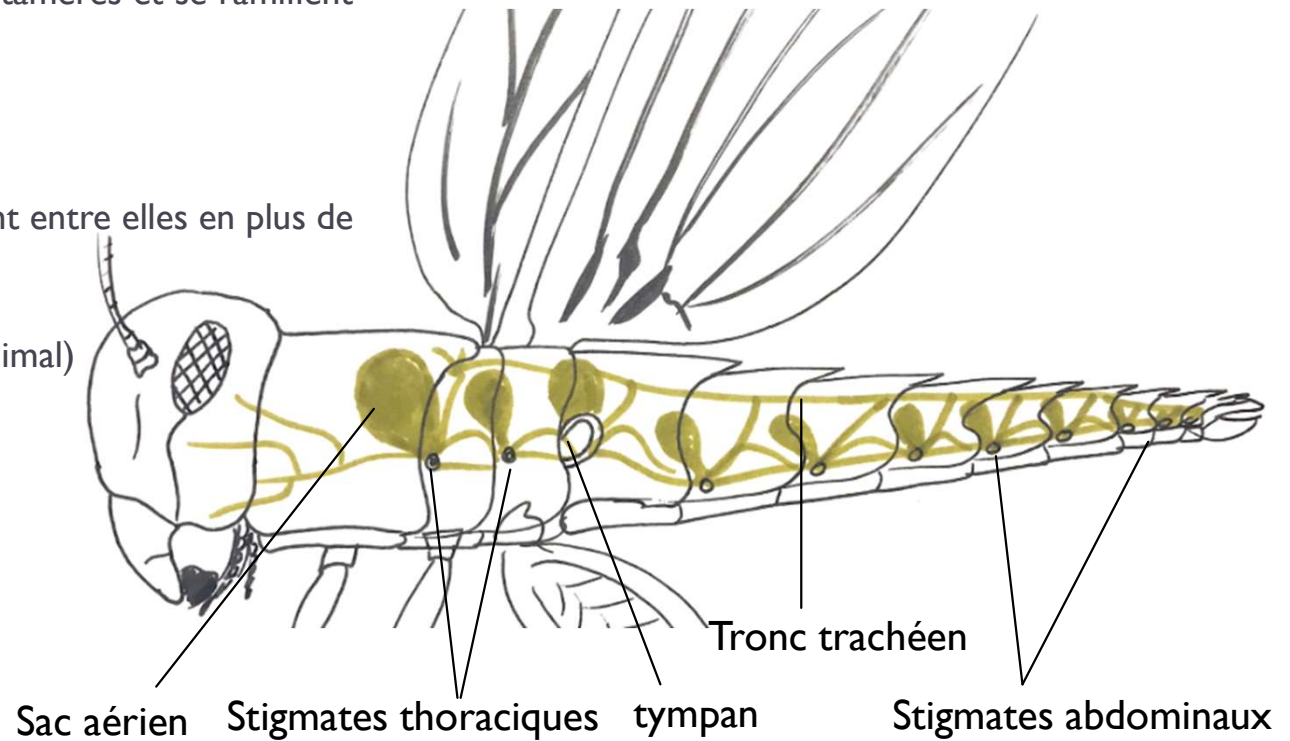
D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

I. Les trachées des insectes



Deux types d'organisations principales du réseau trachéen des Insectes :

- soit les trachées alimentent un (ou plusieurs) métamères et se ramifient mais sans communiquer entre elles
 - ⇒ ventilation bidirectionnelle.
- soit les trachées communiquent longitudinalement entre elles en plus de se ramifier transversalement (cas du criquet):
 - ✓ stigmates inhalants (souvent à l'avant de l'animal)
 - ✓ stigmates exhalants (souvent à l'arrière)
 - ⇒ ventilation unidirectionnelle



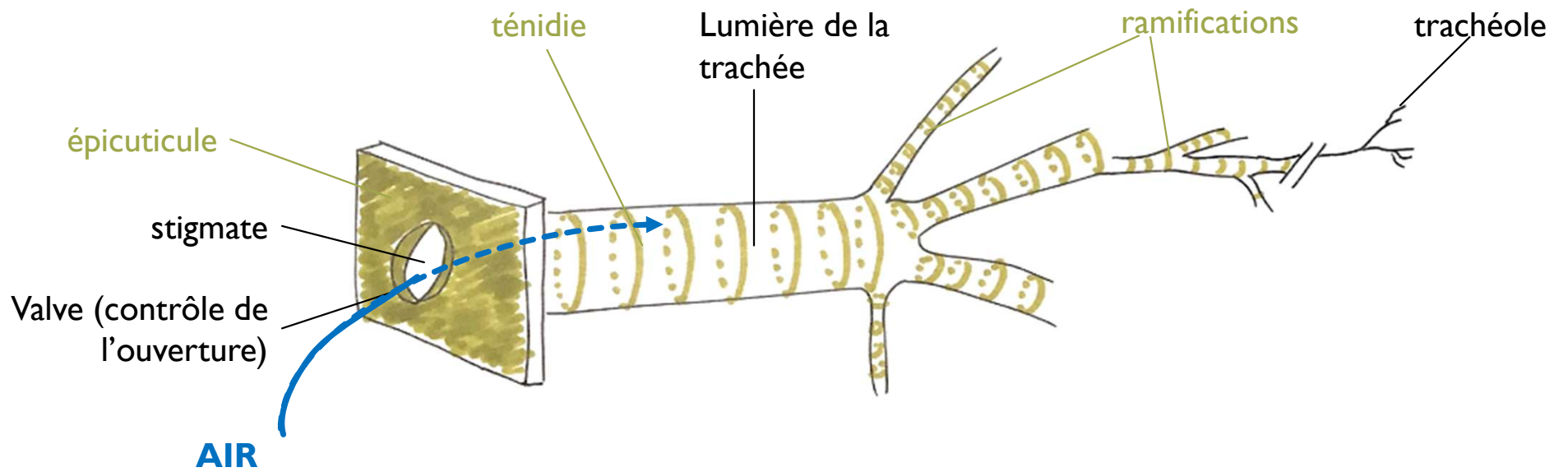
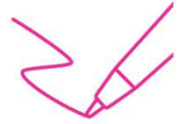
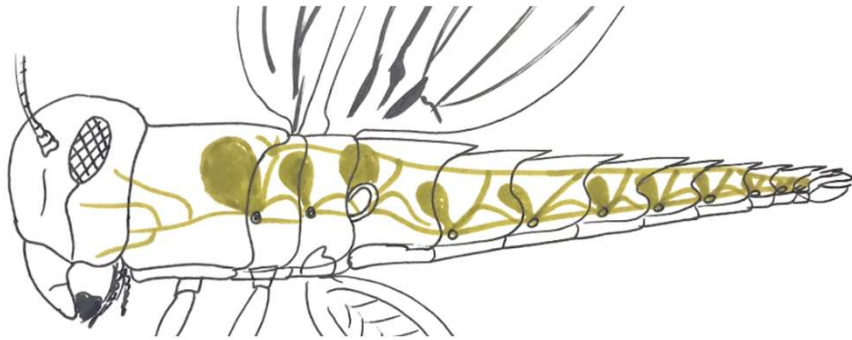
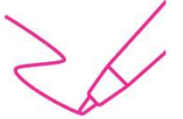
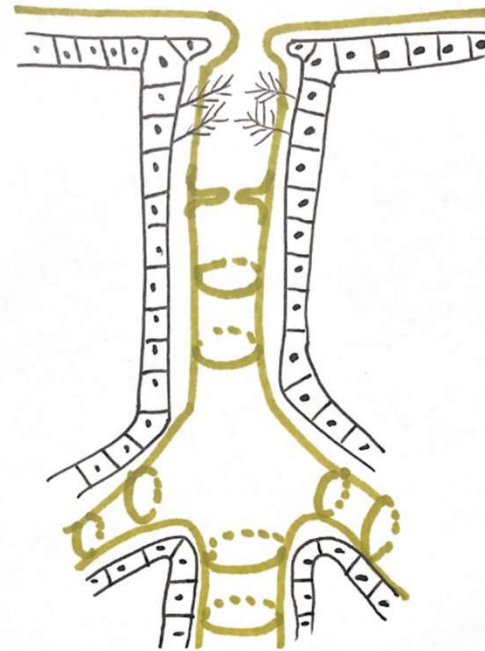
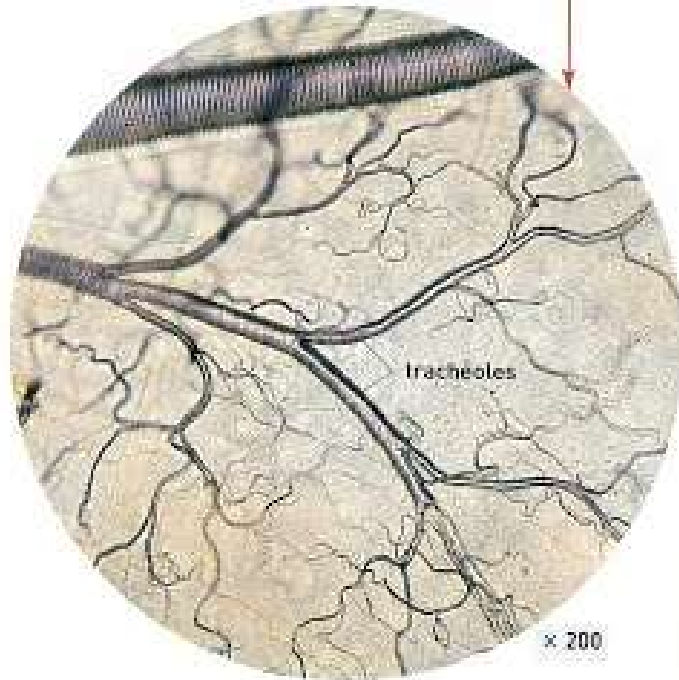
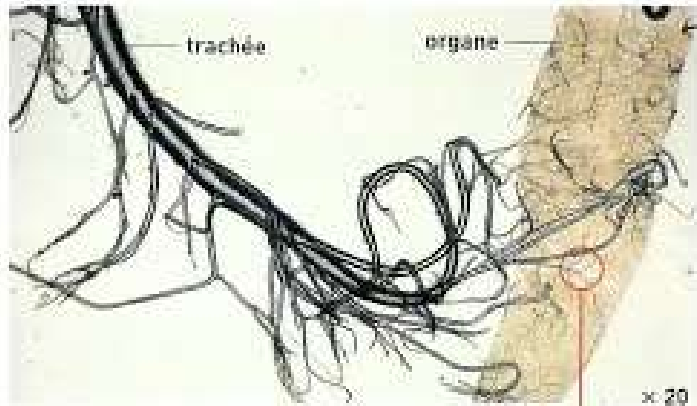


Schéma du système trachéen d'un insecte (S. Dalaine)



II. LA DIVERSITÉ DES SURFACES D'ÉCHANGES RESPIRATOIRES

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINÉES EN MILIEU AÉRIEN

2. Les poumons

2.1. Les poumons unicavitaires

Poumons (n.m.): sont des structures invaginées, localisées dans l'organisme

- Lissamphibiens: vie dans l'eau et dans l'air
- Poumon sacculaire = sans voies aériennes
- Ex: Escargot, Grenouille

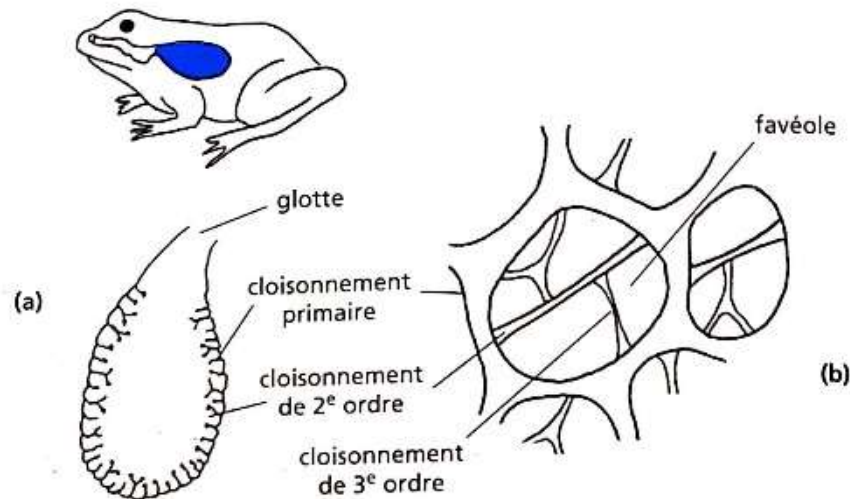
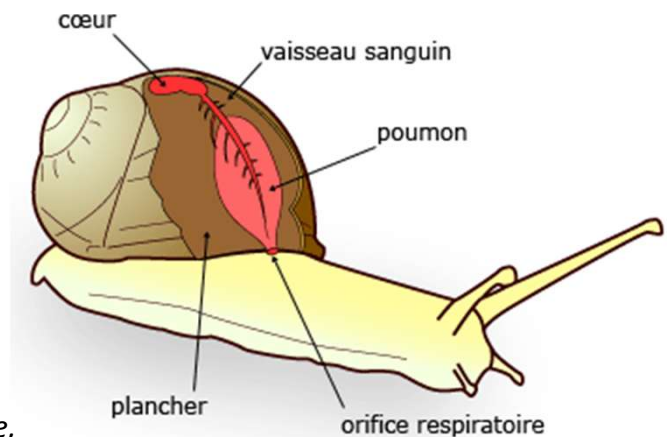


Figure 14 : Poumon unicavitaire, à droite de l'escargot, à gauche d'une grenouille (a : anatomie générale, b : zoom d'une structure cloisonnée (Peycru, 2010))



Orifice respiratoire



D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

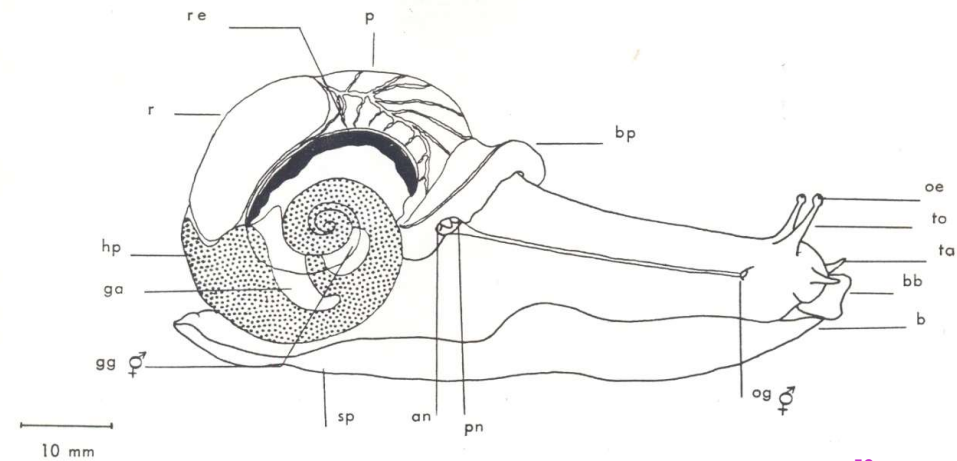
2. 1. Les poumons unicavitaires



Escargot, cavité palléale ouverte : observez les vaisseaux efférents qui se dirigent vers le cœur (non visible).



- Un seul orifice : le pneumostome
- Un seul sac: le poumon sacculaire
- Une riche vascularisation de la cavité palléale



source: P. Thommen

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

2. Les poumons

2.2. Les poumons pluricavitaires : exemple des mammifères



- Milieu terrestre = **milieu desséchant** et **peu porteur** (faible densité)
- ✓ **adaptations limitant les pertes d'eau** et des structures assurant le **support** de l'échangeur.
- L'appareil respiratoire des Mammifères = deux **poumons** + **système conducteur** de l'air ou **voies respiratoires**.
- poumons **pluricavitaires** (sacs pulmonaires multiples = **alvéoles**)
 - **trachée** (rigidifiée par des anneaux cartilagineux)
 - **bronches**
 - **bronchioles**
 - canaux alvéolaires débouchant sur les sacs alvéolaires = plusieurs **alvéoles pulmonaires**.
 - $\sum \text{alvéoles} = 100\text{m}^2$, soit 50 fois la surface de la peau
- **alvéoles** entourées par un **réseau dense de capillaires**, permettant des échanges gazeux intenses.
- La structure ramifiée du poumon favorise la **réétention d'eau** et évite les pertes hydriques (parfois, réabsorption en milieu désertique).

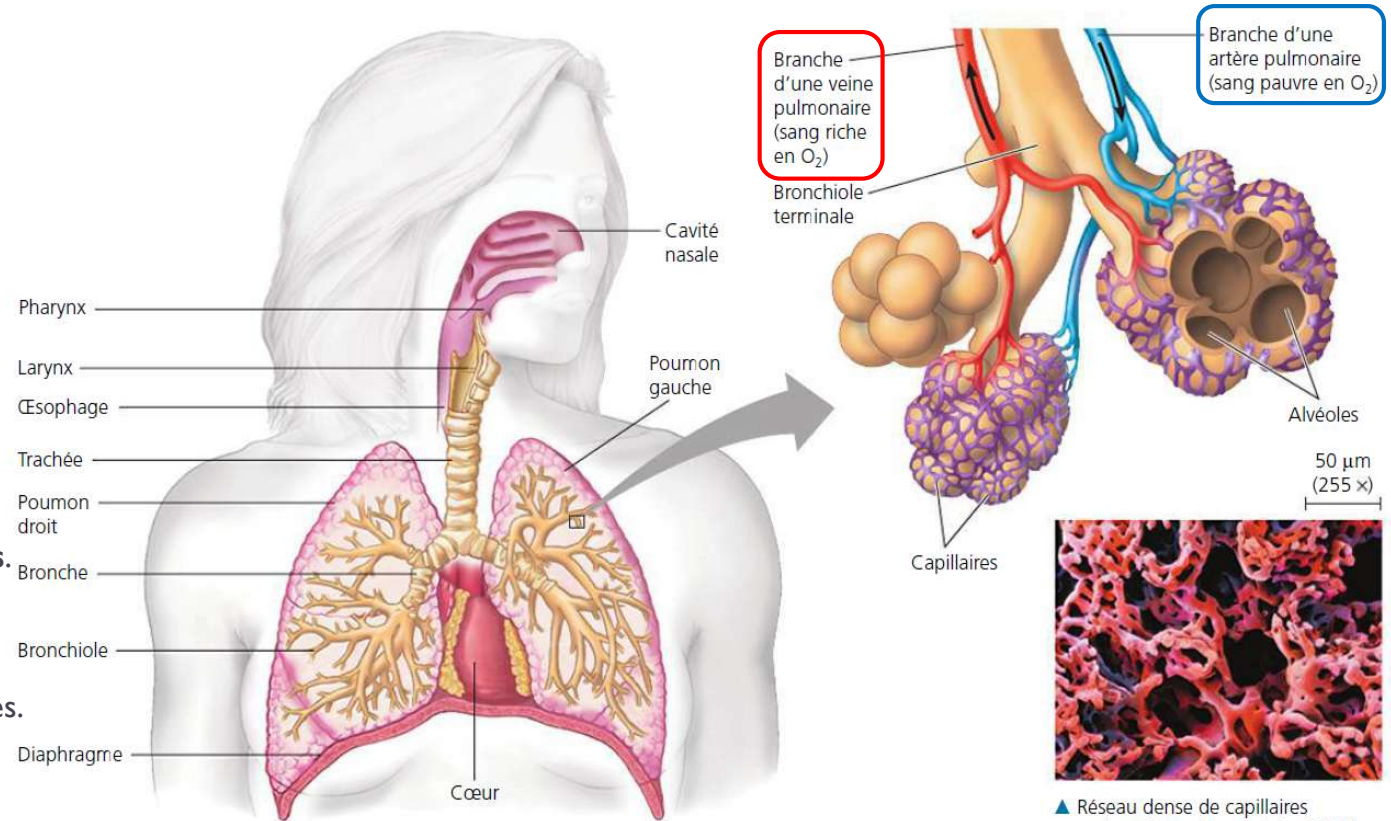


Figure 15 : Structure pulmonaire chez l'homme (Campbell, 2012)

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

2. Les poumons

2.1. Les poumons pluricavitaires

Ramification des poumons des mammifères
(arbre bronchique)

■ Voies aérophores:

- Narines
- Fosses nasales
- Pharynx
- Larynx
- Trachée
- Bronches
- Bronchioles
- Canaux alvéolaires
- Sacs alvéolaires
- Alvéoles (des millions)



Arbre bronchique de bœuf
Musée Fragonard (S. Dalaine)

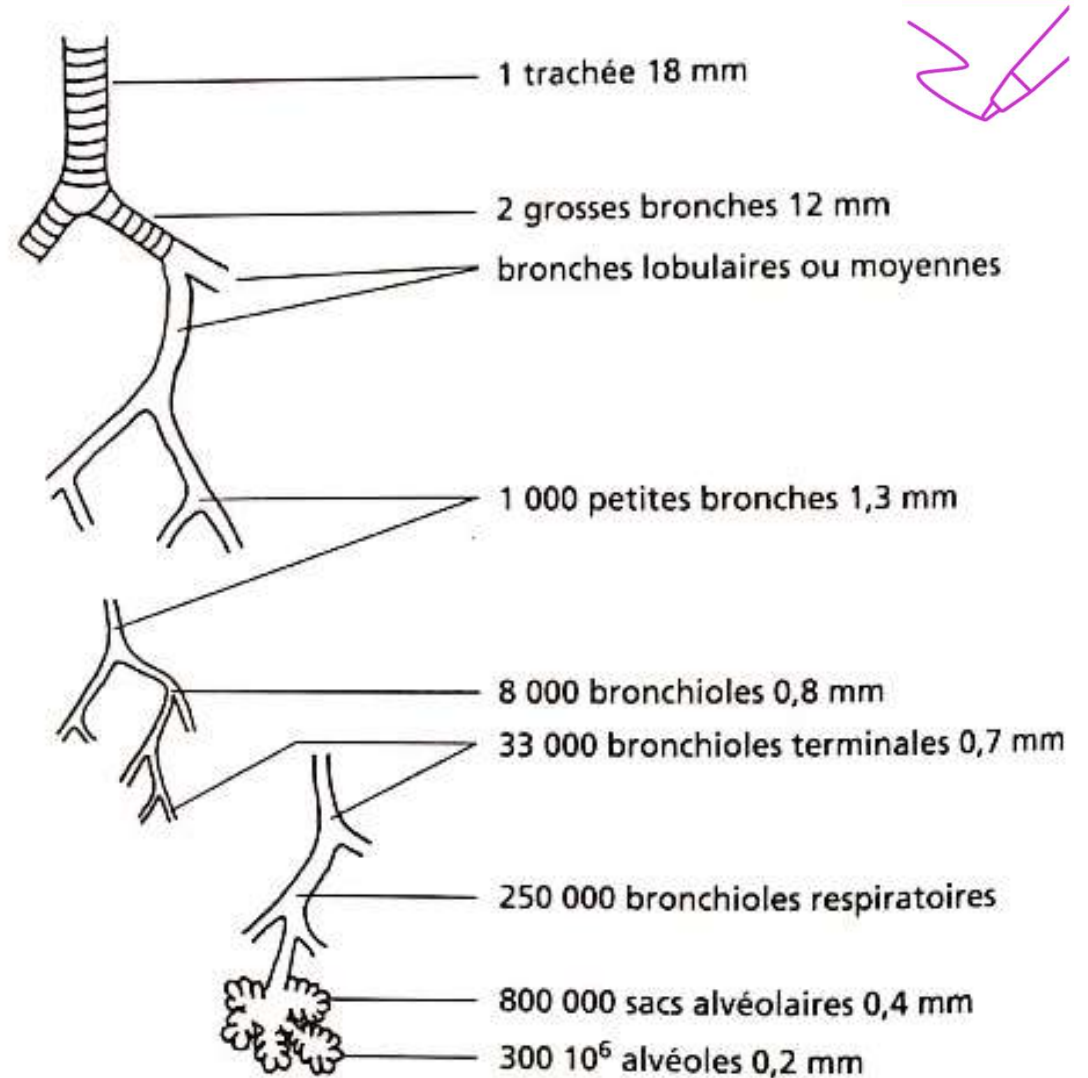


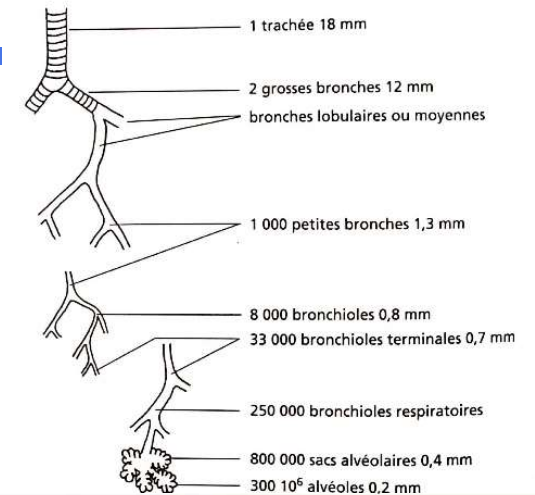
Figure 16 : Ramifications bronchiques (Peycru, 2010)

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

2. Les poumons

2.1. Les poumons pluricavitaires

- Vie aérienne permet une diversité de **modes de locomotion** (reptation, saut, course, vol)
- **Endotherme** (maintien d'un homéostat thermique reposant notamment sur l'énergie thermique libérée par le **métabolisme respiratoire**)
 - ⇒ **Besoins en O₂ élevés**
- Voies aériennes divisées par dichotomie en tubes, bronches, bronchioles dont les fonctions sont:
 - Réchauffer l'air et ainsi augmenter la saturation en H₂O
 - Filtrer l'air (poils, mucus cf surfactant)



Cellule à mucus + cellule ciliée
(épithélium de revêtement)

Muscle lisse

Sous-muqueuse

cartilage

Adventice –tissus adipeux)



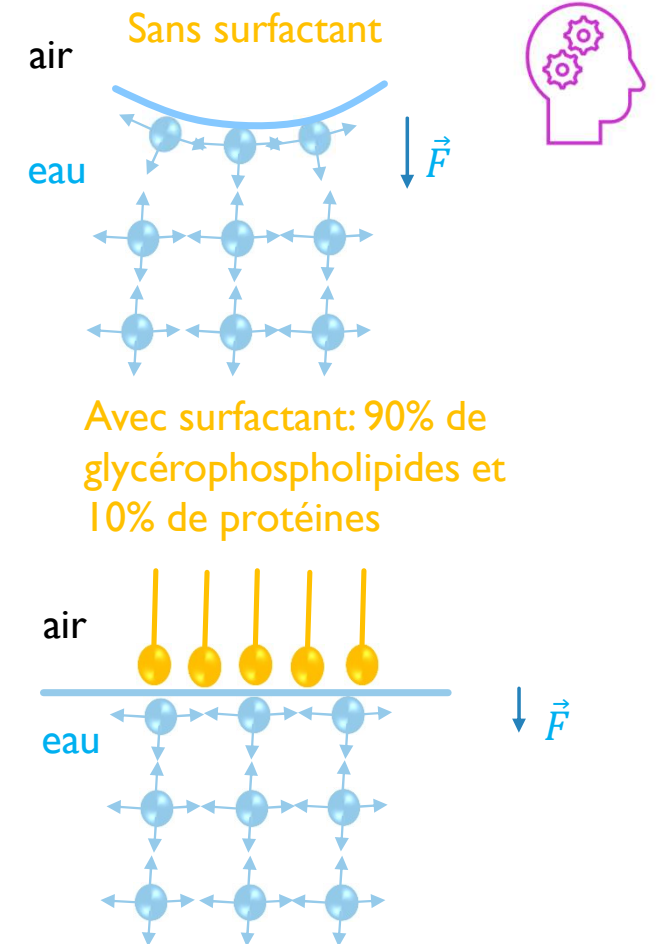
CT de trachée de rat coloration, HE, anneau cartilagineux en CT bien visible (histology.be)

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

2. Les poumons

2.1. Les poumons pluricavitaires

- **Composition du surfactant: 90% de glycérophospholipides + 10% protéines**
- Tension superficielle \vec{F} = résultat des forces d'attraction intermoléculaires appliquées sur les molécules de surface par unité de longueur: $T = F/L$ en $mN.m^{-1}$
- Cette tension superficielle attire plus les molécules de liquide les unes vers les autres et limite leur contact vers les gaz: la tension superficielle induit une **diminution de surface du liquide** (cf ménisque dans un tube à essai)
 - ⇒ la tension superficielle rend le film de surface résistant à l'étirement.
- Les rôles du **surfactant**:
 - **↘ de la tension superficielle** comparativement à présence d'eau seule
 - ⇒ **↘ travail ventilatoire** pendant l'inspiration car dilatation des alvéoles
 - Rôle sur la mécanique ventilatoire: **↗ compliance pulmonaire** (élasticité du tissu pulmonaire)
 - **Éviter le collapsus** lors de l'expiration profonde
 - **Solubiliser l'O₂**
 - **Homéostasie protéique** (maintien de la pression oncotique)
 - **Effet anti-dessiccation**
 - **Facilitation de l'écoulement muqueux**
 - **Défense biologique** (effet antibactérien via les glycoprotéines hydrophiles)



Rôle du surfactant dans l'abaissement de la tension superficielle au sein des alvéoles pulmonaires (S. Dalaine)

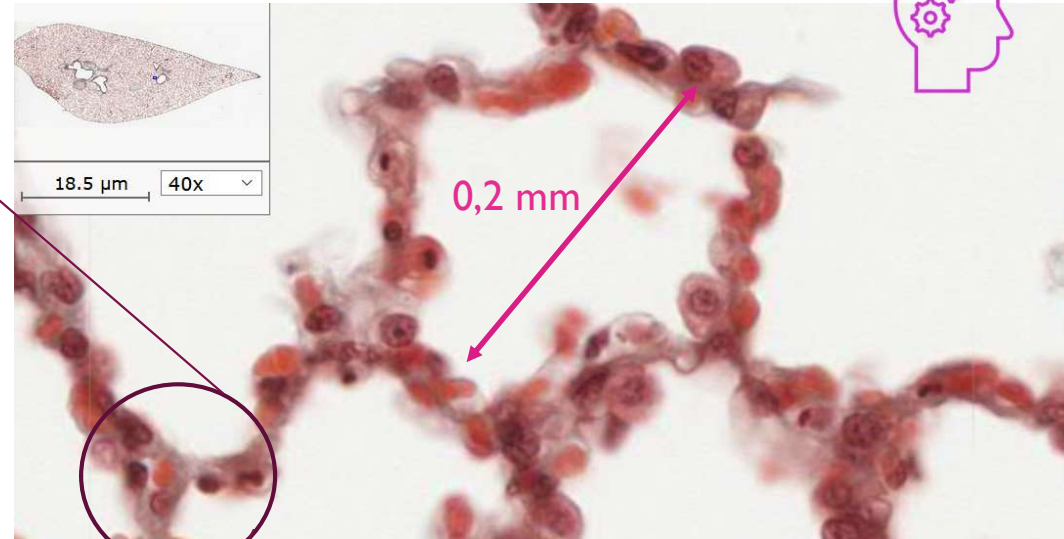
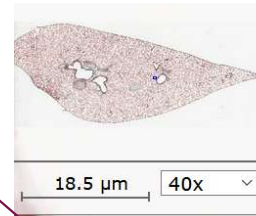
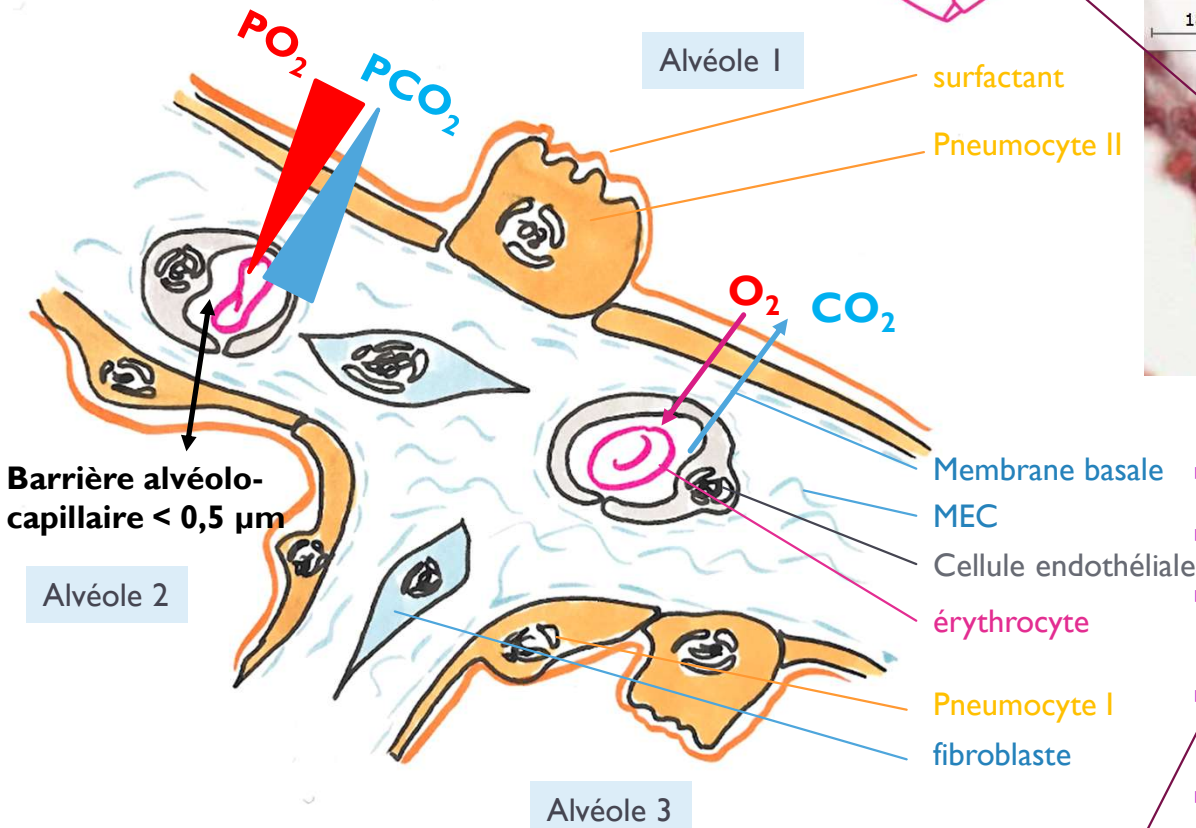
D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

2. Les poumons

2.1. Les poumons pluricavitaires



Structure cellulaire des alvéoles pulmonaires



Coupe histologique d'un poumon de chat insufflé (histology.be)

- Surface totale alvéolaire: 100 m²
- Épithélium simple aplati: 90% pneumocytes I et 10% pneumocytes II
- **Barrière alvéolocapillaire: 0,3 à 0,5 µm (surfactant, pneumocyte I, membrane basale X2, cellule endothéliale)**
- **Surfactant:** substance tension active (90% de lipides et 10% de protéines) de 50 à 100 nm d'épaisseur sécrétée par pneumocytes II
- Dans poumons, **air saturé en vapeur d'eau** => risque de collapsus entre les parois alvéolaires d'où importance du surfactant

Schéma d'une paroi alvéolaire pulmonaire (S. Dalaine)

BCPST1-ENCPB- STÉPHANIE DALAINE

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

2. Les poumons

2.1. Les poumons pluricavitaires

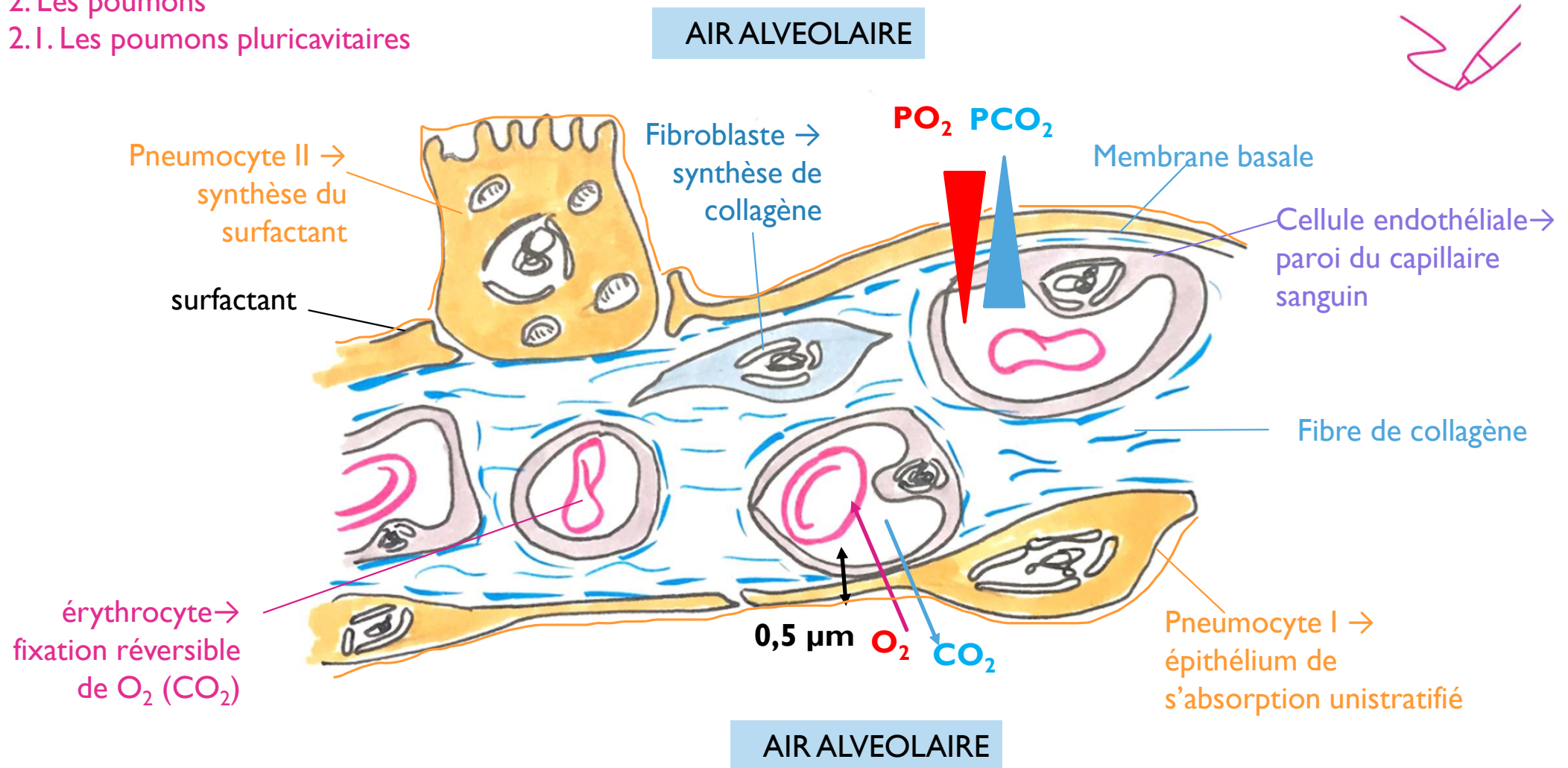
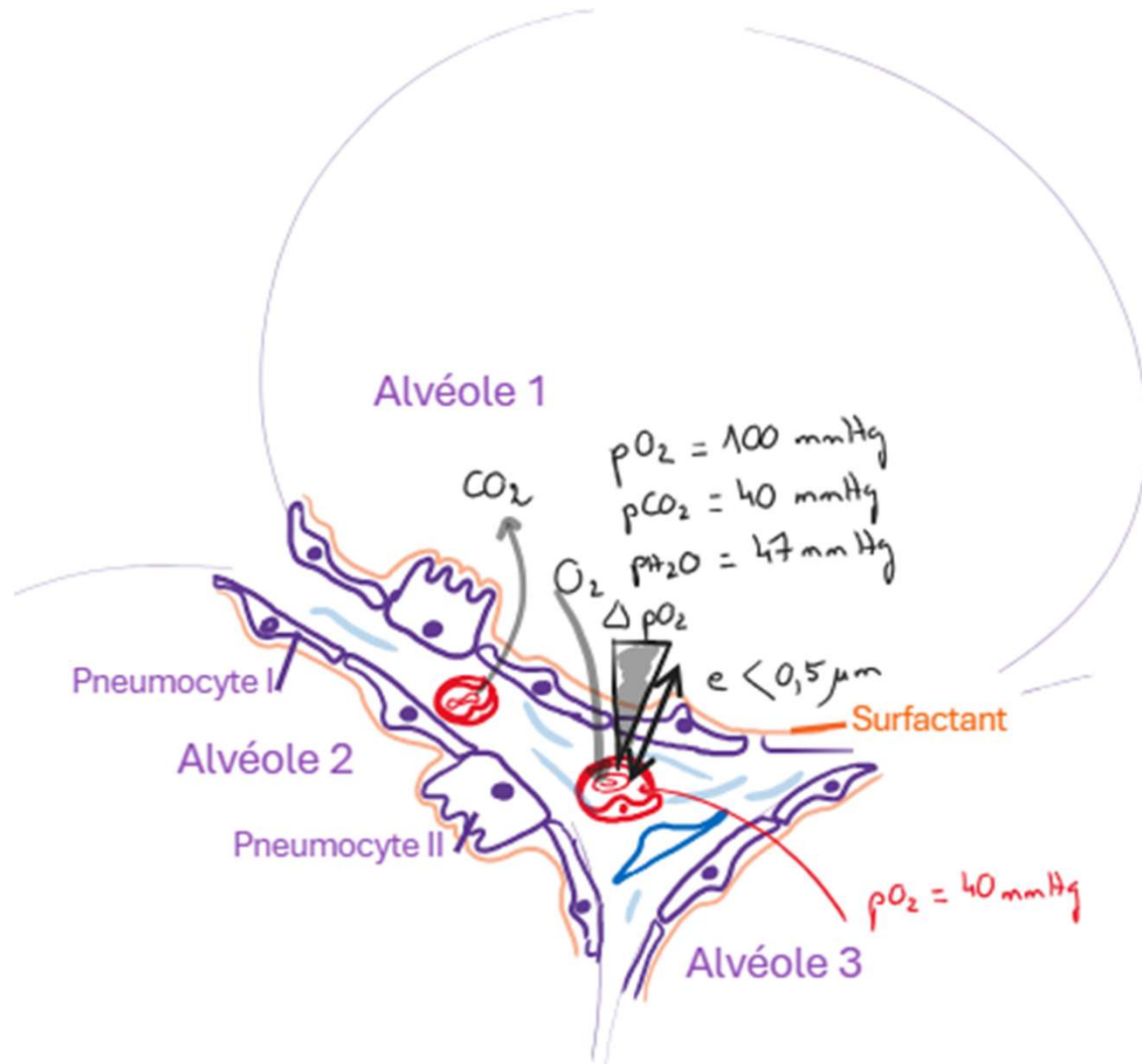


Figure 19 : schéma de la paroi alvéolocapillaire du poumon parenchymateux de Mammifère (S. Dalaine)



D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

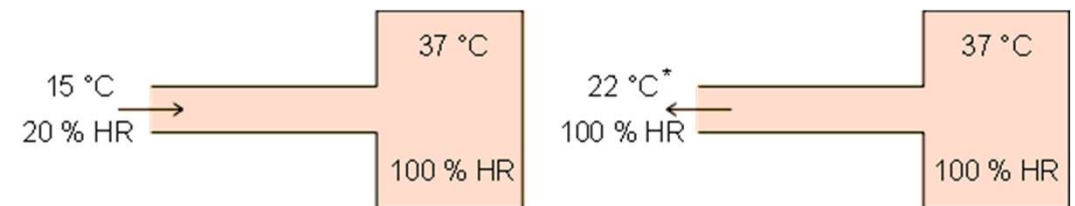
2. Les poumons

2.1. Les poumons pluricavitaires

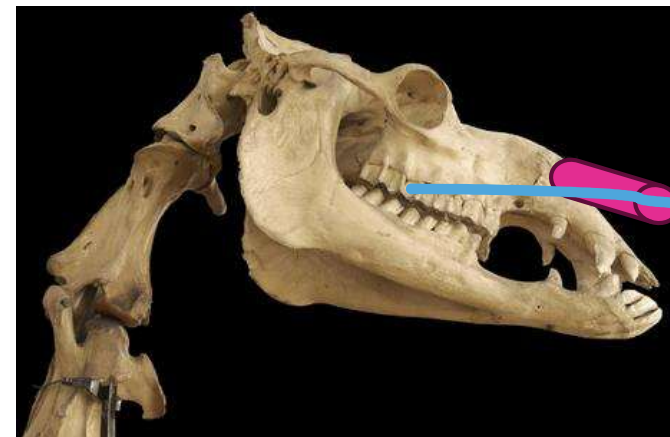
- Respiration dans l'air, adaptation aux pertes hydriques
- Constat: au niveau de la barrière alvéolo-capillaire O_2 passe en solution
 - ⇒ **Épithélium** respiratoire doit être maintenu **constamment humide**
 - ⇒ **air au niveau alvéolaire** constamment maintenu à **saturation d'humidité.**

- Problème: comment maintenir saturation en H_2O max au niveau alvéoles en milieu aérien desséchant?

1. Considérons un air entrant à 15 °C et à 20 % d'humidité relative.
 2. Cet air va gagner de l'énergie thermique et de la vapeur d'eau au fur et à mesure qu'il avance dans les conduits nasaux, les bronches, etc...
 3. pour atteindre 37 °C et la saturation au niveau de la surface d'échange!
- ⇒ + voies respiratoires longues + saturation en H_2O importante
4. A l'expiration, l'air saturé et à 37 °C va perdre de l'énergie thermique au niveau des conduits.
 5. Cette baisse de température va provoquer **une condensation d'eau** qui sera récupérée et servira à l'hydratation de l'air frais entrant.
- ⇒ À l'expiration adaptation au stress hydrique du milieu aérien par récupération de l'eau du réseau respiratoire



HR: Humidité Relative



Air expiré < 100% HR

Crâne de dromadaire: long conduit nasal adapté au milieu désertique (=> récupération de l'eau au moment de l'expiration)

D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

2. Les poumons

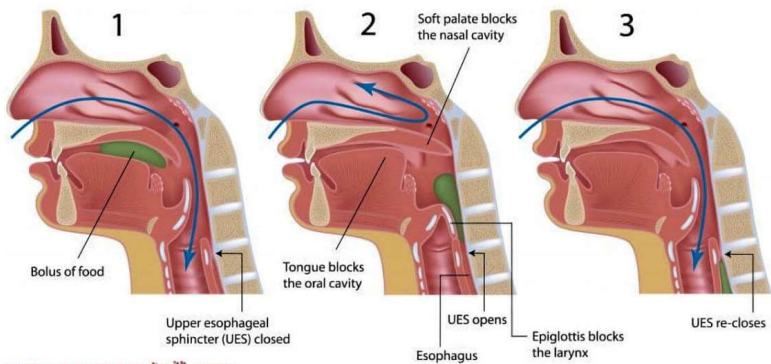
2.1. Les poumons pluricavitaires

Rappel sur le rôle de l'épiglotte

- Au moment de l'ingestion des aliments
- ⇒ larynx monte et fait basculer l'épiglotte en arrière
- ⇒ fermeture de la trachée et ouverture de l'oesophage

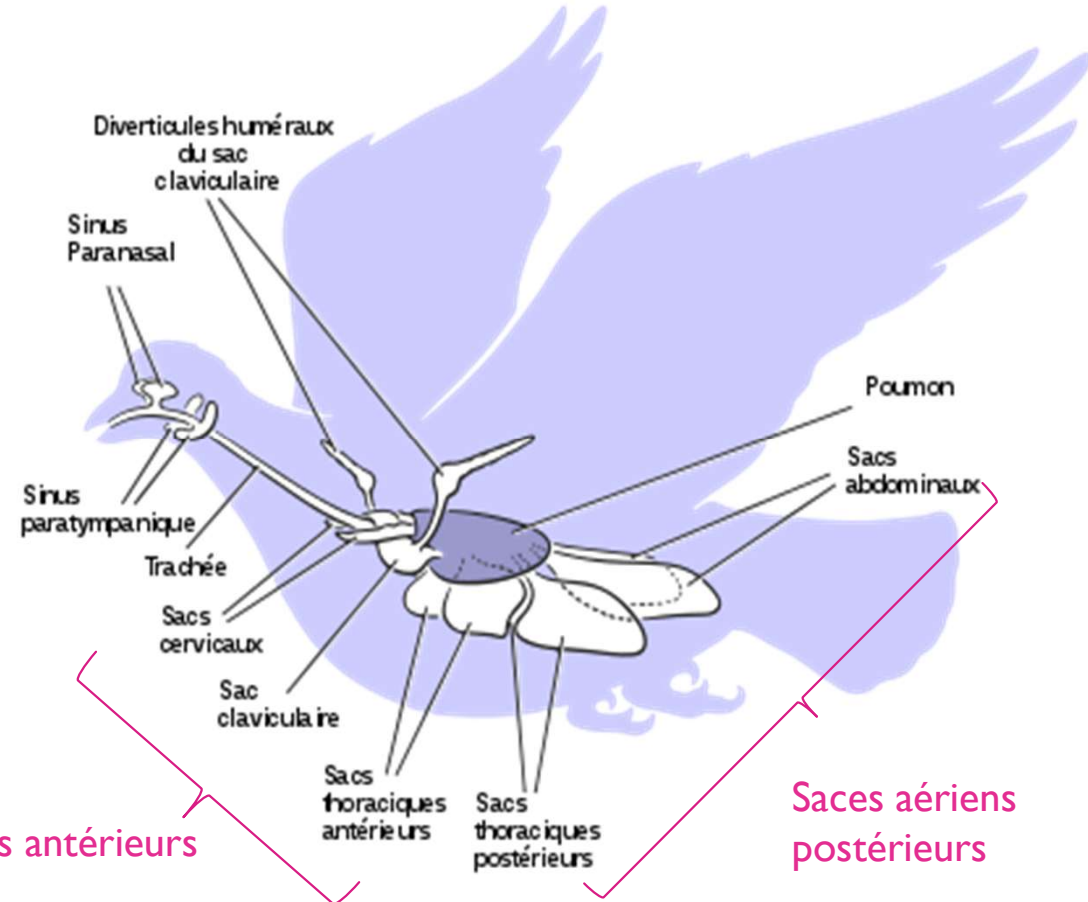
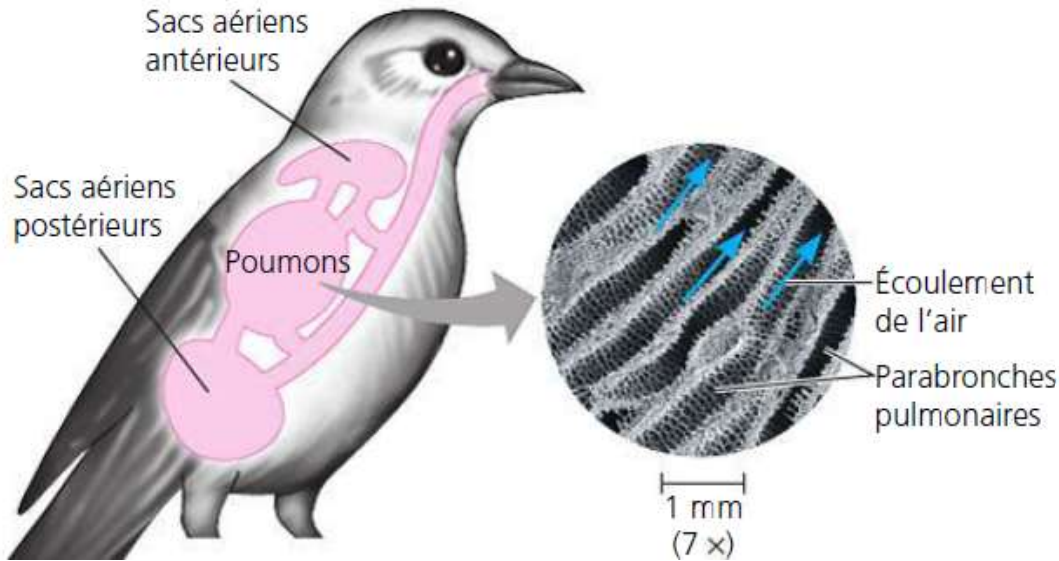


déglutition



D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

3. Les parabronches des oiseaux

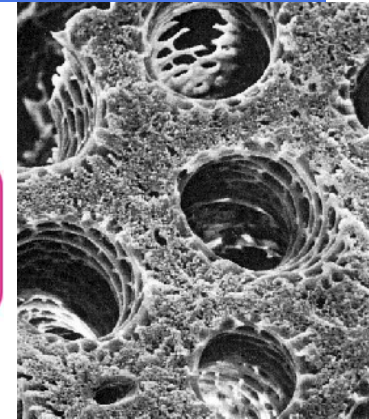


Parabronches des oiseaux (Campbell, 2012)

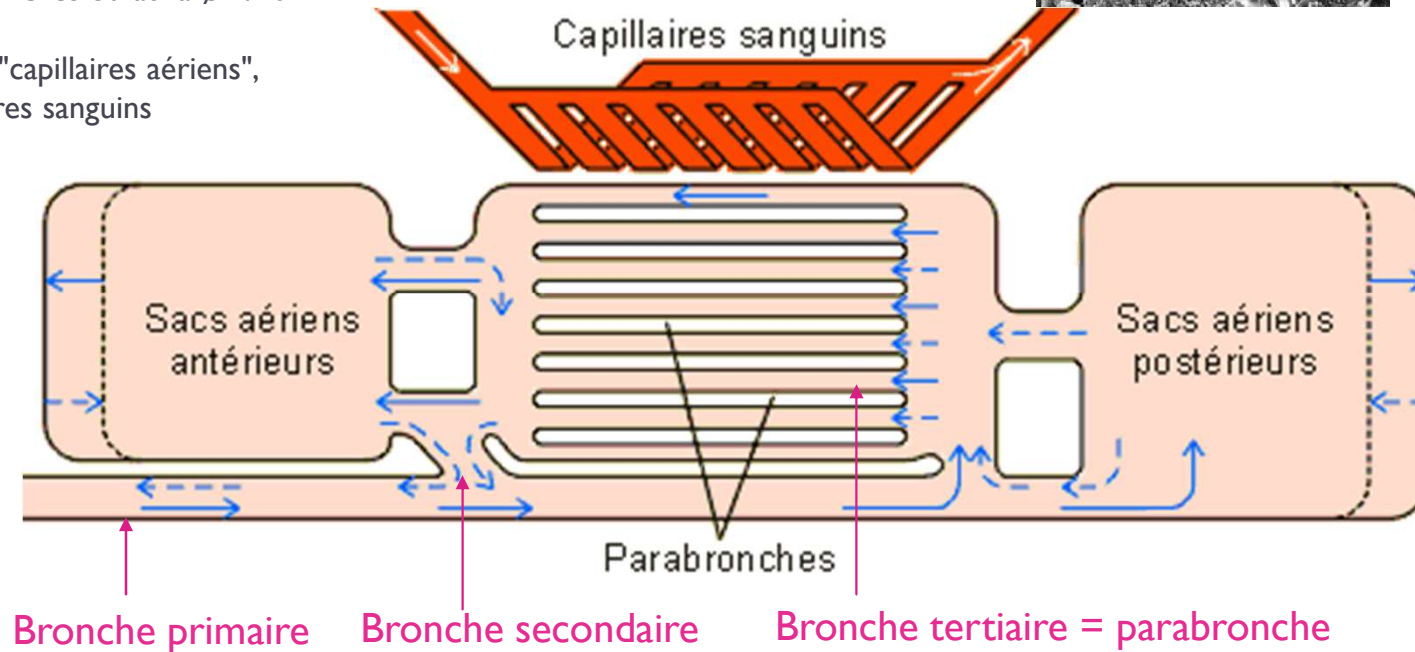
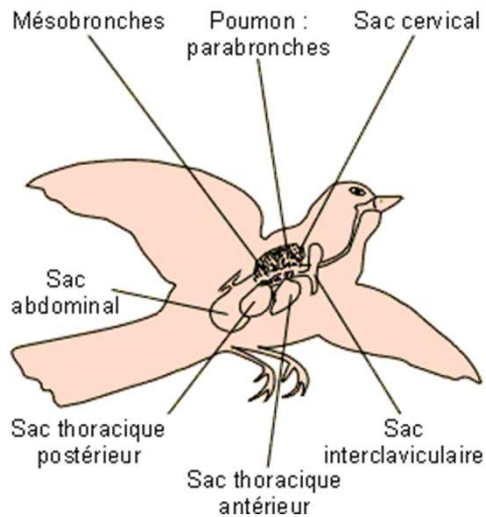
D. STRUCTURES RESPIRATOIRES INVAGINEES EN MILIEU AERIEN

3. Les parabronches des oiseaux

- **deux poumons rigides**, inextensibles dont les unités fonctionnelles sont des **parabronches tubulaires** au niveau desquelles l'air passe toujours **dans le même sens**
- bronche primaire → nombreuses bronches secondaires → très nombreuses bronches tertiaires → circuits parabronchiques (anastomés en parallèle longueur = 1 à 4 cm \varnothing = 1 à 2 mm)
- paroi des parabronches percée d'orifices → chambres ou atria \varnothing 1/10 mm
- atria unis par un réseau de très fins canalicules, "capillaires aériens", entrelacés avec un réseau très dense de capillaires sanguins



Courant croisé + système multi capillaire => excellent rendement d'extraction d'O₂



Bronche primaire Bronche secondaire Bronche tertiaire = parabronche

<http://coproweb.free.fr/pagphy/physioan/ch3s3b.htm#3.4.1.b>

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation

A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères

- B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
- C. Autres exemples de ventilation

IV. Diversité des modes de « convection » interne

- A. Echanges avec le liquide circulant
- B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères

- A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
- B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR: VENTILATION

A. VENTILATION PULMONAIRE CHEZ LES MAMMIFÈRES



I. Mouvements de la cage thoracique à chaque cycle respiratoire

- **cycle respiratoire** = successions de deux mécanismes: l'inspiration (entrée d'air dans les poumons) et l'expiration (sortie d'air des poumons).
- deux **poumons** accolés à la **cage thoracique**
 - **Côtes** (thoraciques osseuses et sternales cartilagineuses) + **muscles** (intercostaux et diaphragme)
 - deux **épithéliums** formant la **plèvre**:
 - ✓ *Épithélium pulmonaire*
 - ✓ *Épithélium pariétal*
 - ✓ **cavité pleurale**: liquide rendant solidaire les deux épithéliums
 - ⇒ **Poumons solidaires de la cage thoracique**

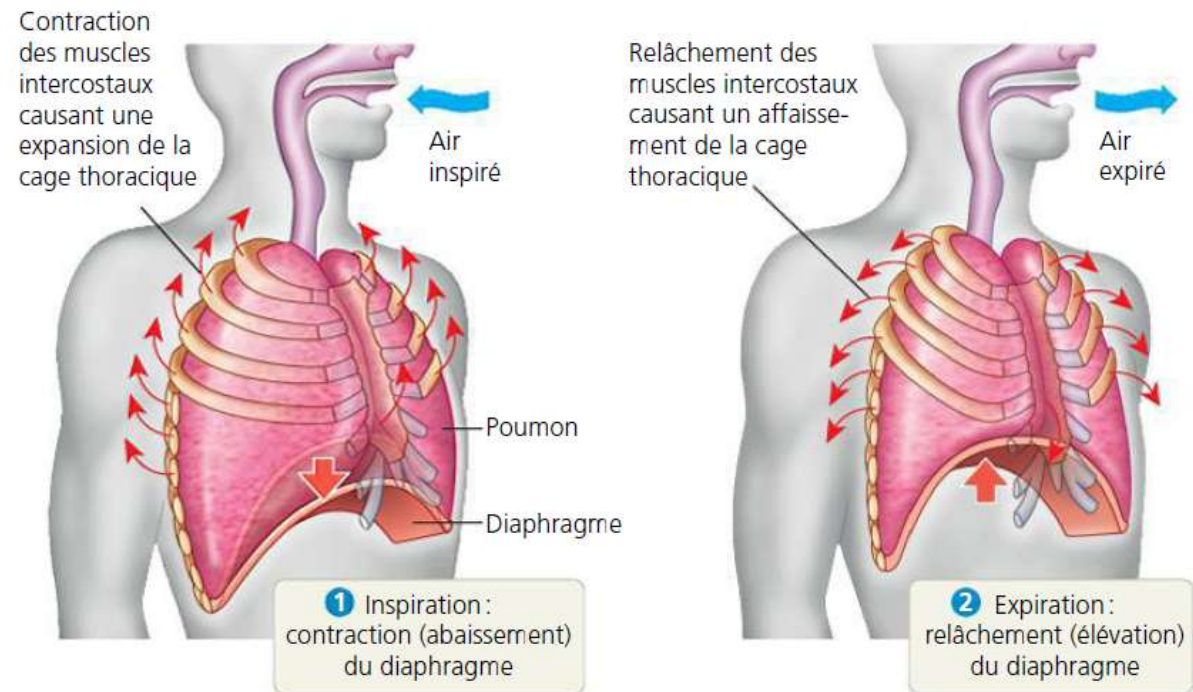
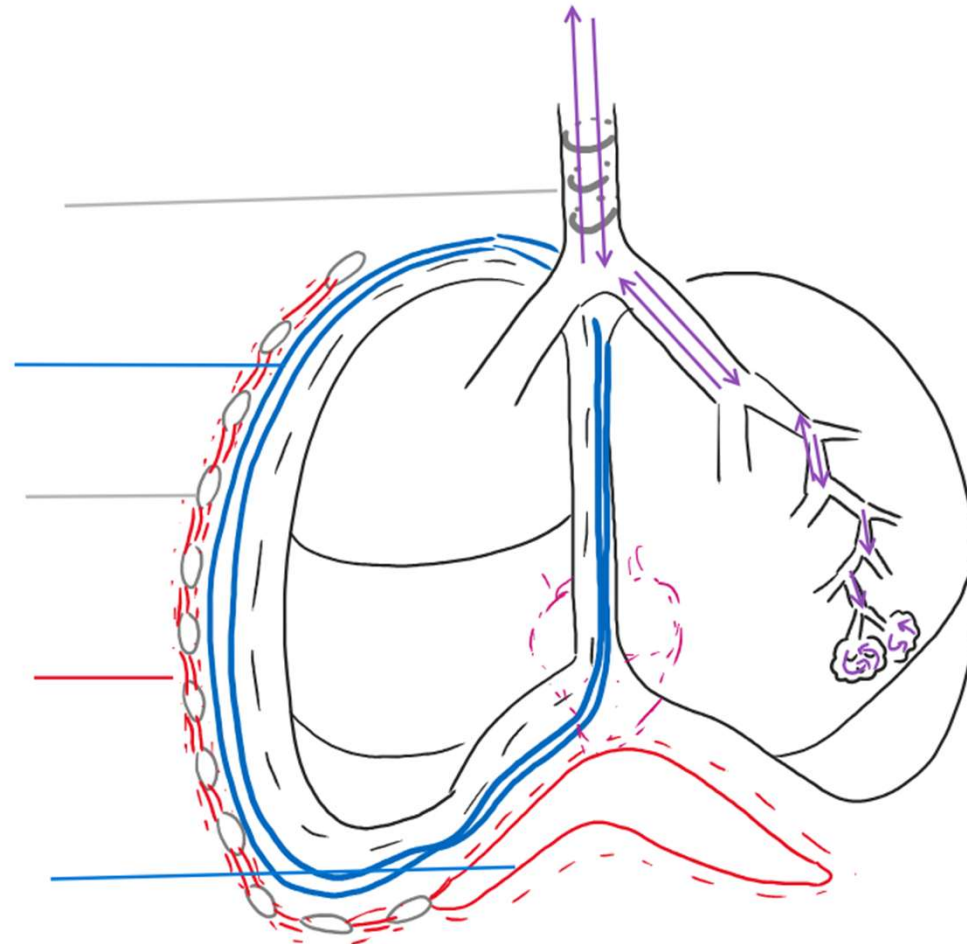
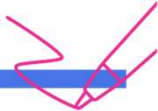


Figure 21 : Ventilation par pression négative pulmonaire chez l'homme (Campbell, 2012)

INSPIRATION ACTIVE
EXPIRATION PASSIVE





Trachée avec anneaux cartilagineux

- ⇒ Conduction de l'air et évitement du collapsus

Plèvre = deux feuillets accolés unis par un liquide

- ⇒ Poumons solidaires de la cage thoracique en mouvement

Côté thoracique

- ⇒ Cage rigide associée aux muscles

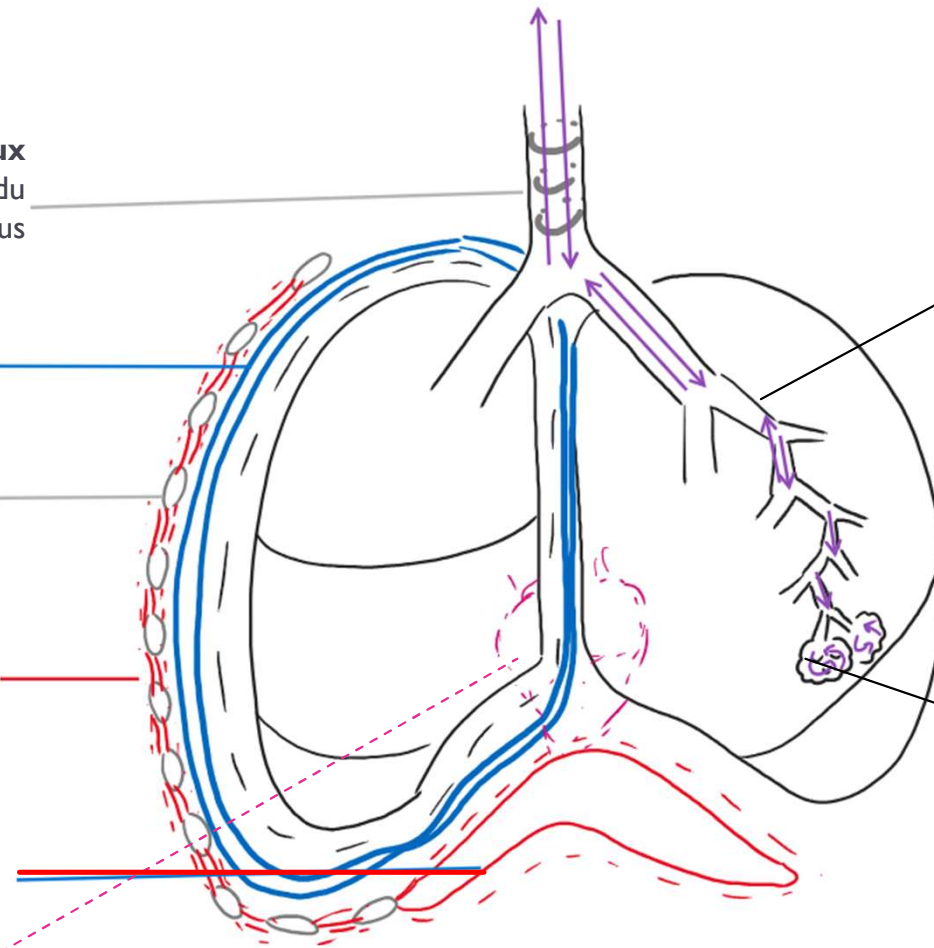
Mise en mouvement des poumons solidaires

- ⇒ Variation de V et de P

Muscles intercostaux et diaphragme

- ⇒ mise en mouvement de la cage thoracique
- ⇒ Inspiration active
- ⇒ Expiration plutôt passive

Cœur: pompe assurant la mise en circulation du sang, liée aux poumons par les artères pulmonaires et les veines pulmonaires (petite circulation)



Arbre bronchique (bronche bronchiole sac alvéolaire alvéole)

- ⇒ Internalisation limitant pertes hydriques
- ⇒ Saturation de l'air alvéolaire en H_2O
- ⇒ Grande surface d'échange

Sac alvéolaire avec nbreuses alvéoles

- ⇒ Compliance permettant variation de V
- ⇒ Échanges gazeux suivant variation de P
- ⇒ Diffusion des gaz vers le sang suivant gradient de P

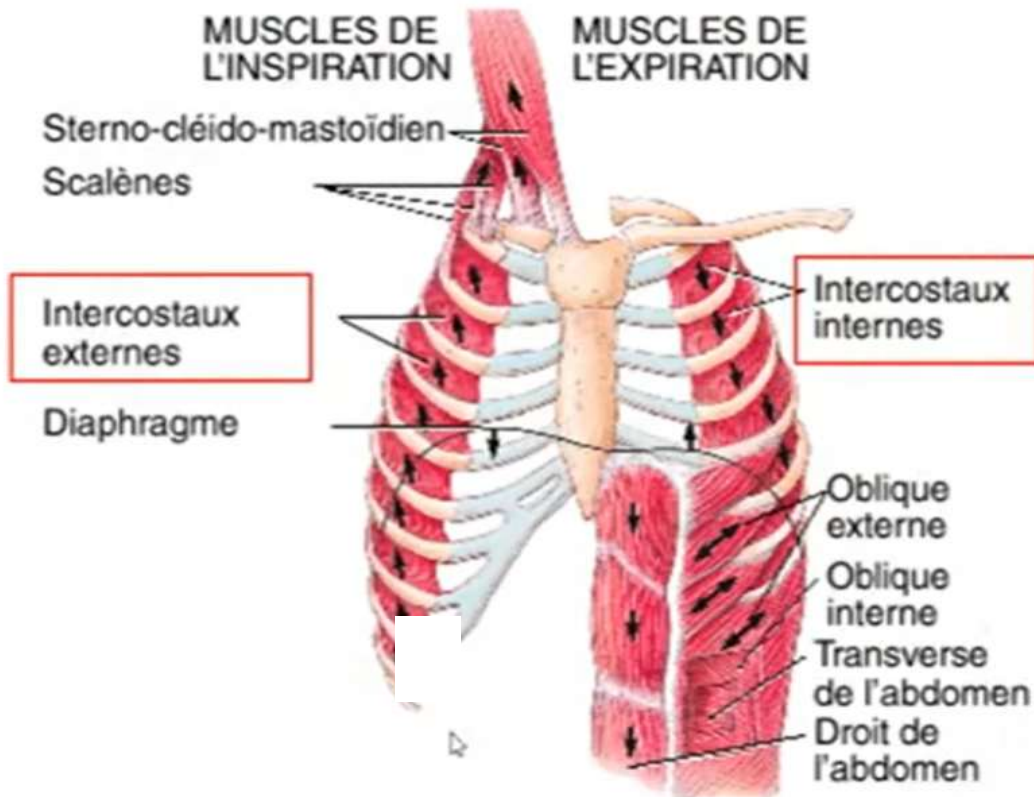
III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR: VENTILATION

A. VENTILATION PULMONAIRE CHEZ LES MAMMIFÈRES

I. Mouvements de la cage thoracique à chaque cycle respiratoire



La variation du volume de la cage thoracique fait intervenir de nombreux muscles, mais surtout le diaphragme



- Muscle majoritairement impliqué dans l'inspiration: **le diaphragme (et les muscles intercostaux externes)**
- L'expiration normale est un processus passif
- Les deux types de muscles intercostaux exercent des effets antagonistes
- *Les muscles accessoires de l'inspiration (impliqués dans les inspirations profondes): le muscle sterno-cléido-mastoïdien et les scalènes ainsi que le petit pectoral*

VENTILATION À PRESSION NÉGATIVE

Augmentation du volume de cage thoracique

- ⇒ \searrow pression de l'air dans poumons < pression atmosphérique
- ⇒ entrée d'air

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR: VENTILATION

Grâce à la plèvre: mouvements des poumons sont solidaires de ceux de la cage thoracique

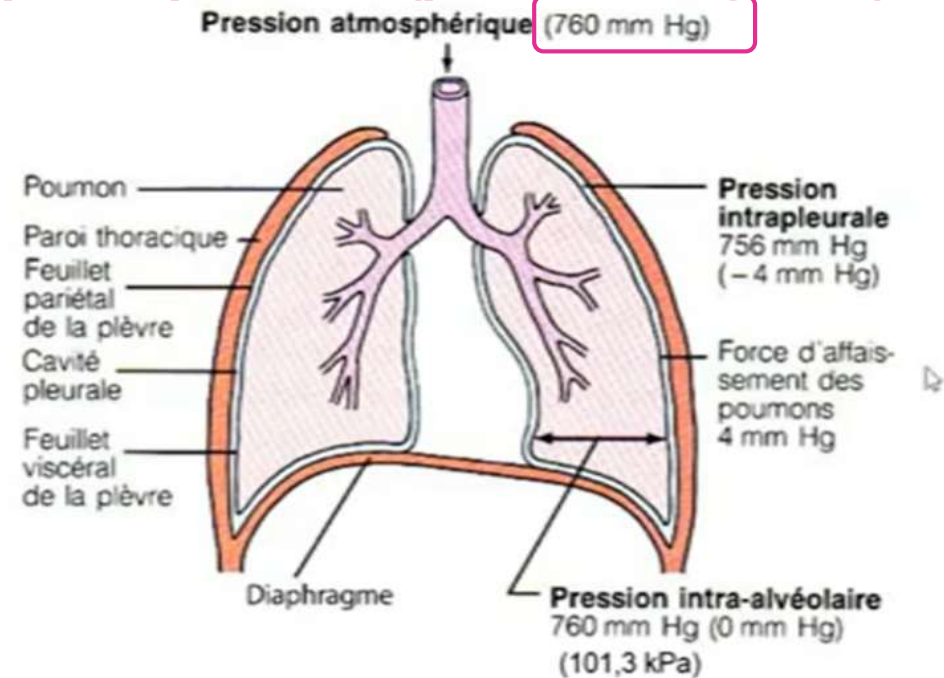
A. VENTILATION PULMONAIRE CHEZ LES MAMMIFÈRES

2. La plèvre et son rôle dans l'entrée d'air par dépression (pression négative)

- Inspiration = contraction des muscles intercostaux et du diaphragme



- ⇒ **↑ volume de la cage thoracique**
- ⇒ **↓ pression intra pleurale qui lui est solidaire (rappel Boyle Mariotte si V ↑ alors P ↓).**
- ⇒ **poumons sont étirés,**
- ⇒ **↑ volume des alvéoles**
- ⇒ **↓ pression intra-alvéolaire diminue.**
- ⇒ **Entrée dans alvéoles de l'air atmosphérique frais par pression négative**



$$P \text{ transpulmonaire} = P \text{ intra-alvéolaire} - P \text{ intrapleurale}$$

- Pression intrapleurale (756 mmHg) toujours < pression atmosphérique (760 mmHg)



- Pression transpulmonaire assurant ouverture des alvéoles et empêche aux alvéoles de collaber

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR: VENTILATION

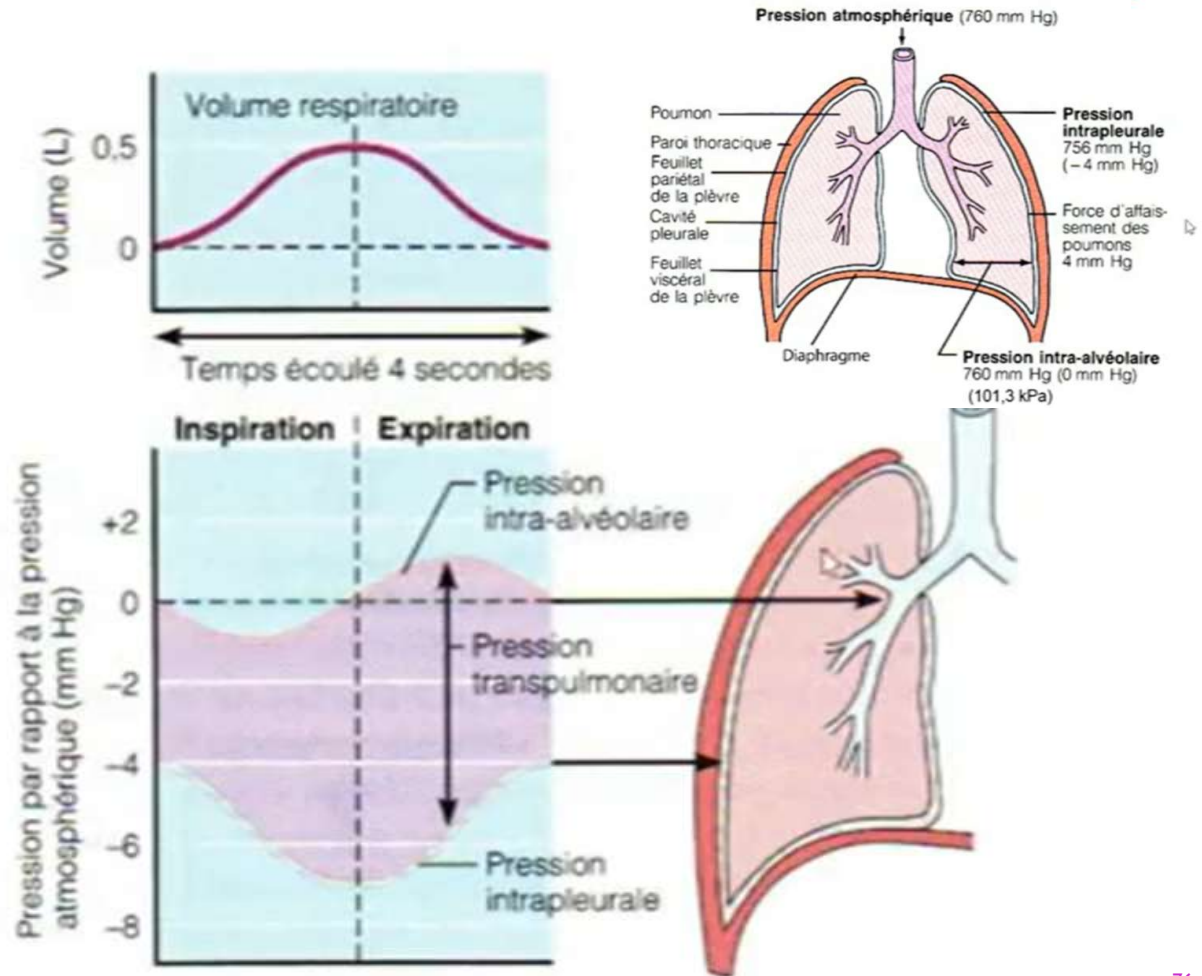
A. VENTILATION PULMONAIRE CHEZ LES MAMMIFÈRES

2. La plèvre et son rôle dans l'entrée d'air par dépression (pression négative)



L'importance de la pression intrapleurale

- ⇒ Lors de l'inspiration: ↗ volume de la cage thoracique
- ⇒ ↘ pression intrapleurale (753 mmHg)
- ⇒ étirement des poumons
- ⇒ ↗ volume intra-alvéolaire
- ⇒ ↘ pression intra-alvéolaire qui reste < à pression atmosphérique
- ⇒ Air atmosphérique (à 760 mmHg) entre dans les alvéoles
- ⇒ Alvéoles se remplissent d'air et voient leur pression augmenter pendant la 2nde phase d'inspiration



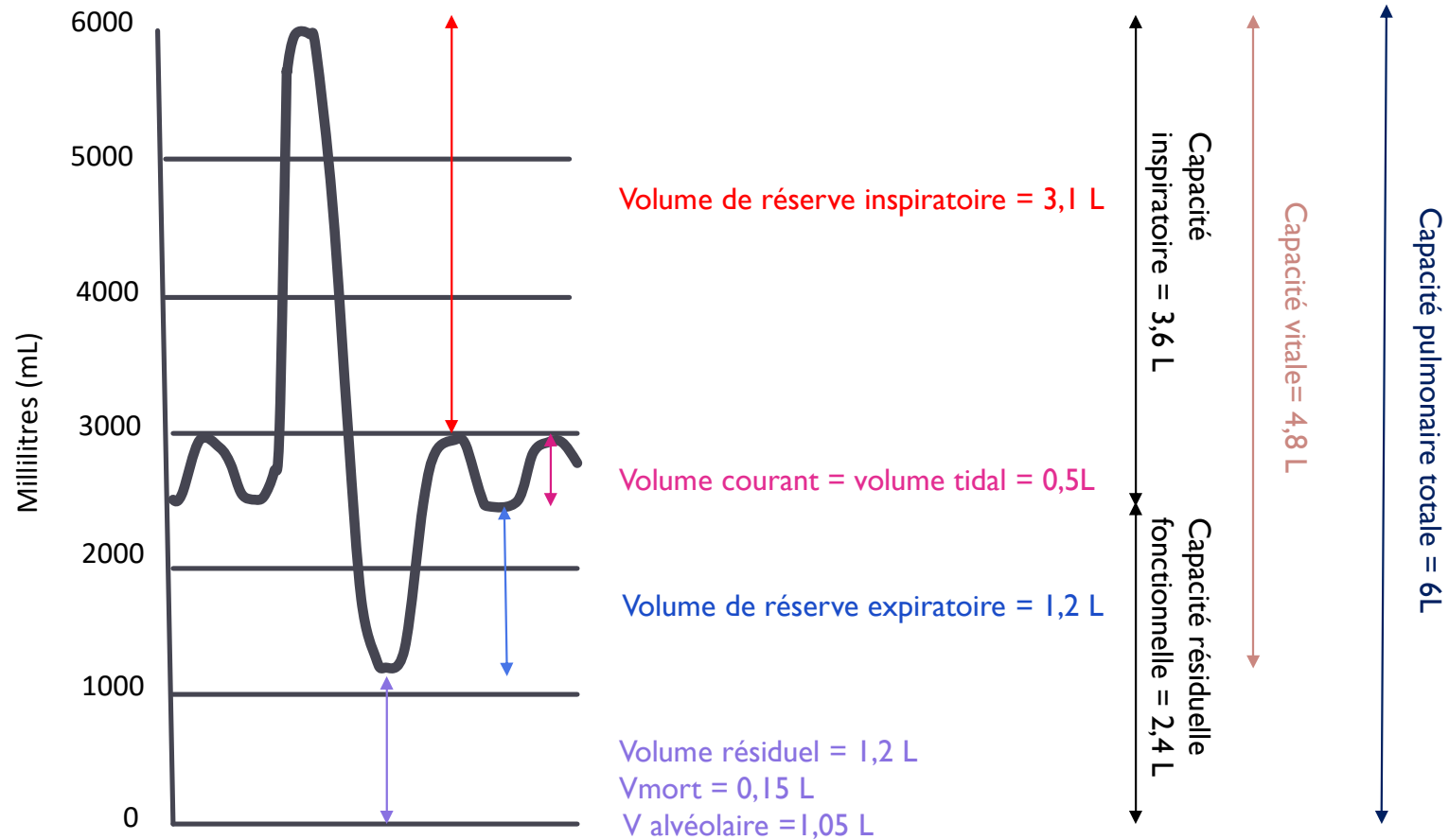


Figure 23: spirogramme normal d'un homme adulte (valeurs moyennes)

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR: VENTILATION

A. VENTILATION PULMONAIRE CHEZ LES MAMMIFÈRES

3. Quelques paramètres respiratoires

- Le **volume courant** (500 mL) = volume tidal (VC ou VT) correspond au volume échangé à chaque cycle respiratoire
- Le **volume de réserve inspiratoire** (3,1 L) correspond au volume supplémentaire qui peut être inspiré avec un effort musculaire
- Le **volume de réserve expiratoire** (1,2 L) correspond au volume supplémentaire qui peut être expiré avec un effort
- La **capacité vitale** = VC + VRI + VRE = 5L
- La **capacité résiduelle fonctionnelle** correspond à la quantité d'air restant dans les poumons après une expiration courante (2,4 L)
- Le **volume résiduel** (1,2 L) : volume encore présent dans les voies respiratoires à l'issue d'une expiration forcée. Le volume résiduel comprend le volume mort et un volume d'air alvéolaire car les alvéoles ne se collabent jamais (sauf en cas de pneumothorax)
- Le **volume mort** (150 mL) correspond à la zone des voies respiratoires contenant un volume constant non exploité

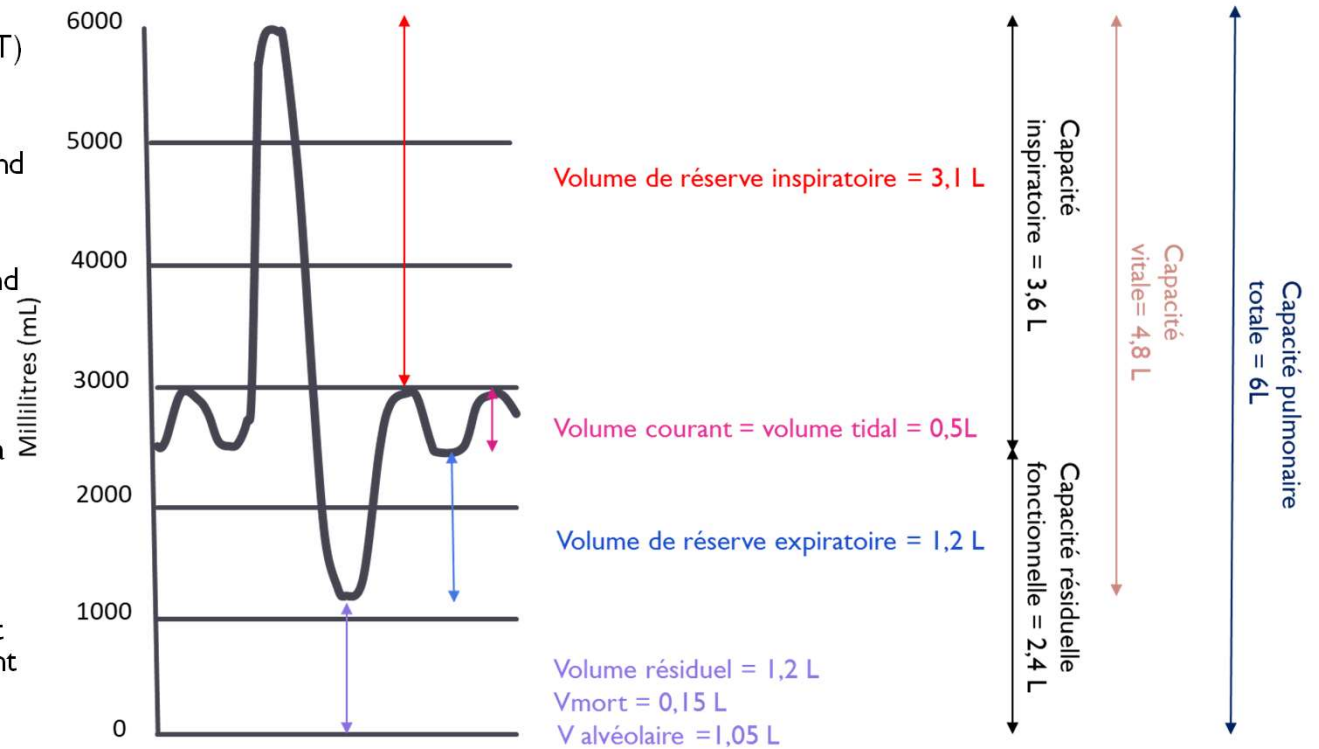


Figure 23: spiogramme normal d'un homme adulte (valeurs moyennes)

A. VENTILATION PULMONAIRE CHEZ LES MAMMIFÈRES

3. Quelques paramètres respiratoires

L'efficacité de la respiration dépend de sa fréquence et de son amplitude

L'efficacité de la respiration peut être estimée par le calcul du débit ventilatoire :

$$D_v = f \cdot V_c$$

D_v en L.min⁻¹

f nombre de cycles

V_c en L.cycles⁻¹

	Volume courant (ml)	Fréquence respiratoire (respiration/minute)	Ventilation pulmonaire (ml/min)	Volume de l'espace mort (ml)	Air frais renouvelé dans les alvéoles (ml)	Ventilation alvéolaire (ml/min)
Ventilation normale	500	12	6000	150	350	4200
Ventilation profonde et plus lente	750	8	6000	150	600	4800
Ventilation superficielle et plus rapide	300	20	6000	150	150	3000

Volume courant, fréquence respiratoire, ventilation pulmonaire, volume de l'espace mort, air frais renouvelé dans les alvéoles et ventilation alvéolaire pour différents mode de ventilation (normale, profonde, rapide)

Figure 24 : efficacité de la respiration, lien avec la fréquence et l'amplitude

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR: VENTILATION

A. VENTILATION PULMONAIRE CHEZ LES MAMMIFÈRES

4. Échanges gazeux alvéolaires

- Seulement en moyenne 30% de l'air alvéolaire est renouvelé
- Or P_{O_2} après saturation en humidité = 150 mmHg d'où
- De plus P_{CO_2} alvéolaire = 40 mmHg
- D'où P_{O_2} alvéolaire = $0,21 * (760 - 47 - 40) = 140$ mmHg
- Mais...
- Diffusion de O_2 de l'alvéole vers capillaires sanguin (30%)
- soit P_{O_2} alvéolaire = $140 * 0,7 = 100$ mmHg
- **$P_{O_2} = 100$ mmHg dans l'air alvéolaire**
- P_{O_2} sang artère pulmonaire = 40 mmHg
- **Donc P_{O_2} air alvéolaire > P_{O_2} sang**
- **Diffusion simple de l'alvéole vers sang après solubilisation du dioxygène**
- C'est inverse pour P_{CO_2}
- **Ventilation bidirectionnelle** au sein des alvéoles

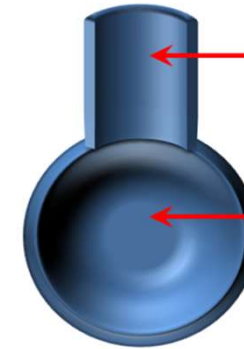
← Air atmosphérique sec

$$P_{atm} = 760 \text{ mmHg}$$

$$P_{atm} H_2O = 0 \text{ mmHg}$$

$$P_{atm} O_2 = 21\% \times 760 = 160 \text{ mmHg}$$

$$P_{atm} CO_2 = 0.04\% \times 760 = 0.3 \text{ mmHg}$$



← Air trachéale réchauffé et saturé en eau

$$P_{trach} H_2O = 47 \text{ mmHg}$$

$$P_{trach} O_2 = 21\% \times (760 - 47) = 150 \text{ mmHg}$$

$$P_{trach} CO_2 = 0.04\% \times (760 - 47) = 0.29 \text{ mmHg}$$

← Air alvéolaire

$$P_{alv} H_2O = 47 \text{ mmHg}$$

$$P_{alv} O_2 = 14\% \times (760 - 47) = 100 \text{ mmHg}$$

$$P_{alv} CO_2 = 5.6\% \times (760 - 47) = 40 \text{ mmHg}$$

Figure 25 : Pressions partielles du dioxygène et du dioxyde de carbone dans les alvéoles pulmonaires

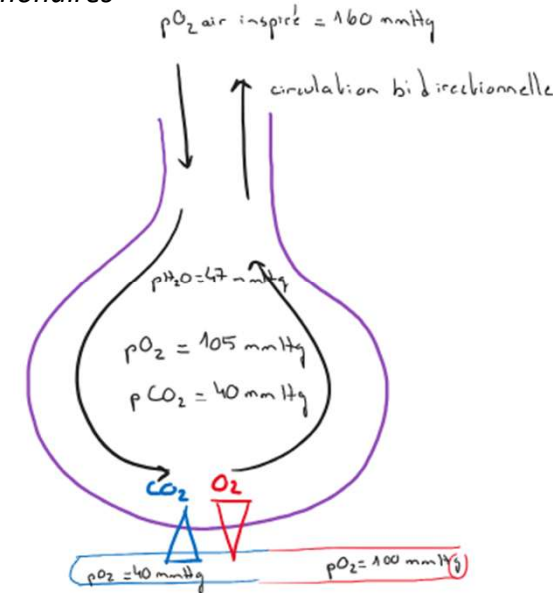
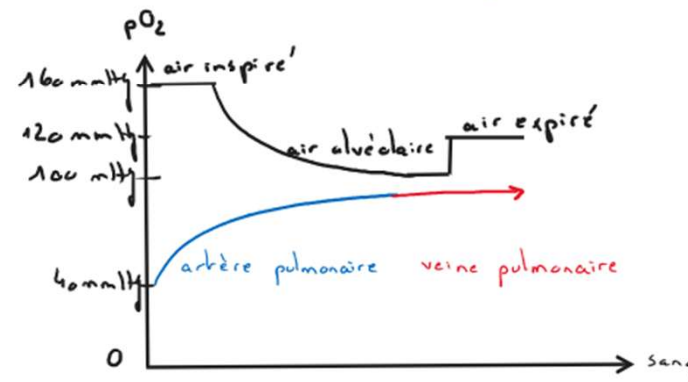
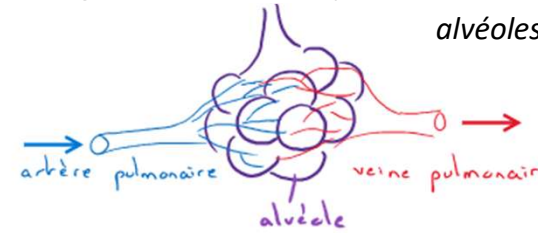


Figure 26: échanges air/sang à travers l'alvéole pulmonaire (S. Dalaine)

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

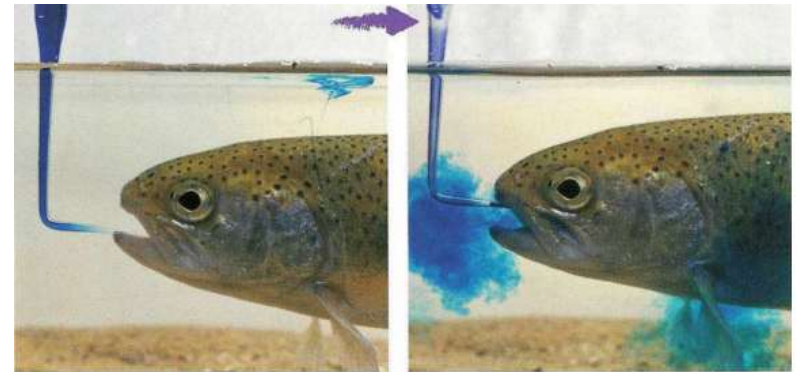
- III. **Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation**
 - A. **Ventilation pulmonaire chez les Mammifères**
 - B. **Ventilation branchiale chez les Téléostéens**
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION B. VENTILATION BRANCHIALE DES TÉLÉOSTÉENS

<https://youtu.be/GAm8VCXOW0Q>



Flux d'eau unidirectionnel



Requin (chondrychien et non téléostéen, déplacement la gueule ouverte)

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION

B. VENTILATION BRANCHIALE DES TÉLÉOSTÉENS



Rappels: loi de Boyle-Mariotte
 $PV = cste$
 Donc si $V \searrow$ alors $P \nearrow$

- **ventilation passive** en suivant les courants du milieu extérieur, dans des zones bien oxygénées
 - **ventilation active** par mise en jeu de 2 pompes: **pompe buccale puis operculaire**
1. abaissement du plancher buccal : $\nearrow V$ et $\searrow P$
 Ouverture de bouche \rightarrow entrée d'eau dans CB et diffusion vers CO (suivant $\searrow P$)
 2. Fermeture de bouche et levée du plancher buccal et abaissement du plancher operculaire $\rightarrow \searrow V$ et $\nearrow P$ dans CB \rightarrow diffusion de CB vers CO
 3. Remontée du plancher operculaire + ouverture de l'ouïe \rightarrow effet de pression/suction, responsable d'un mouvement unidirectionnel de l'eau, depuis la bouche jusqu'à l'opercule
 4. Abaissement du plancher buccal: nouveau cycle ventilatoire

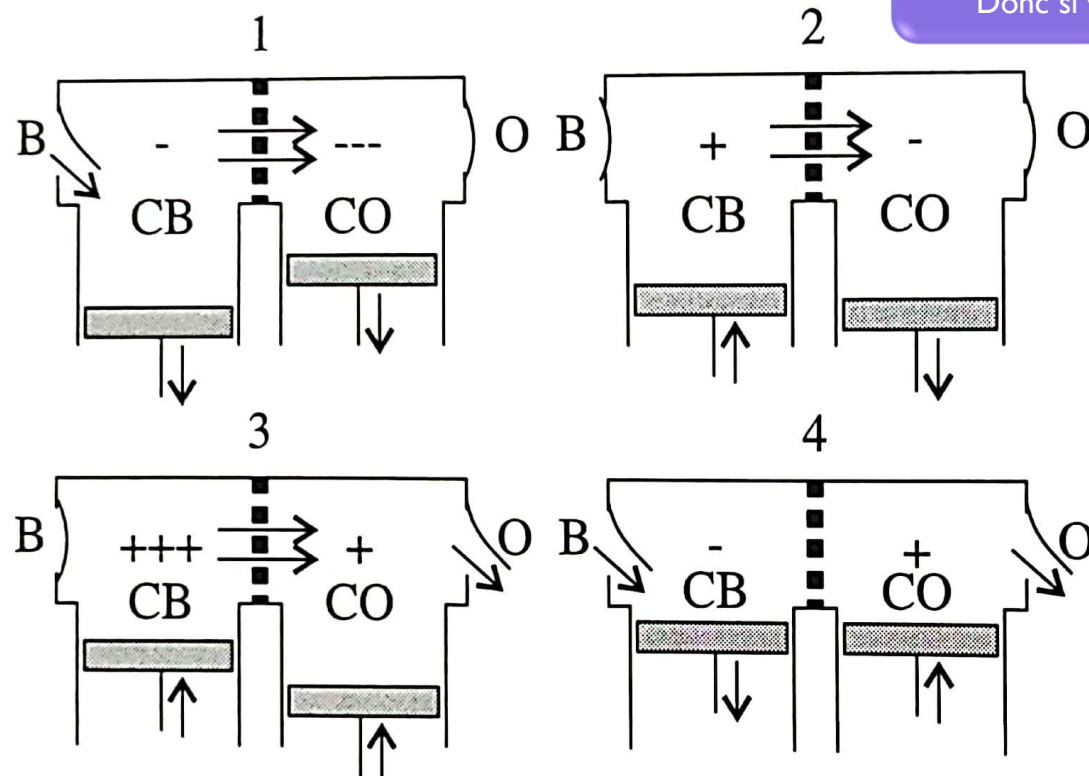
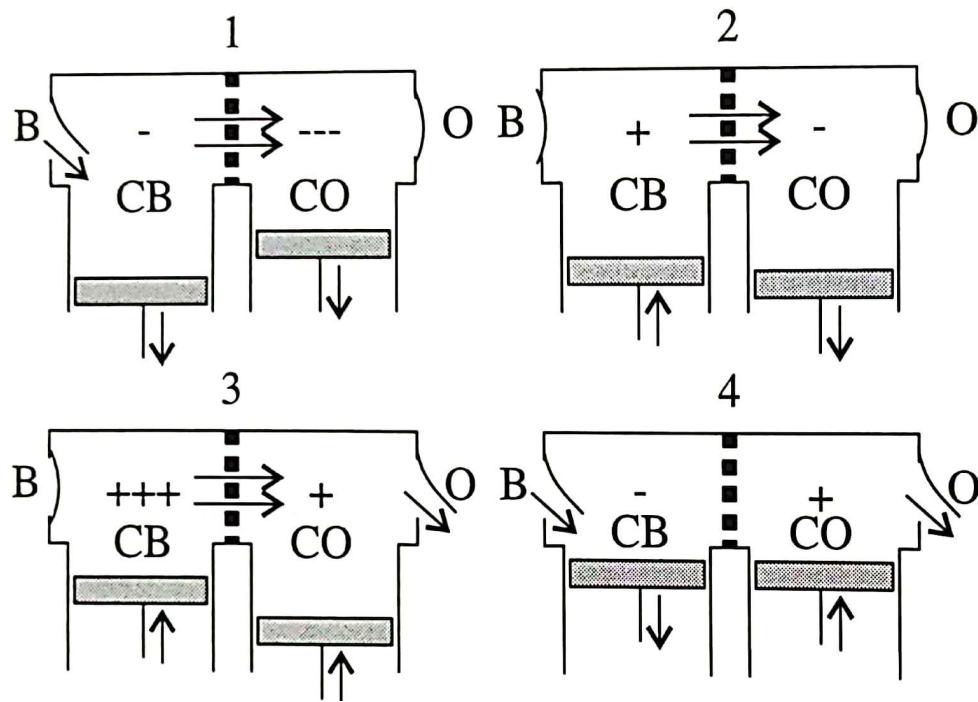


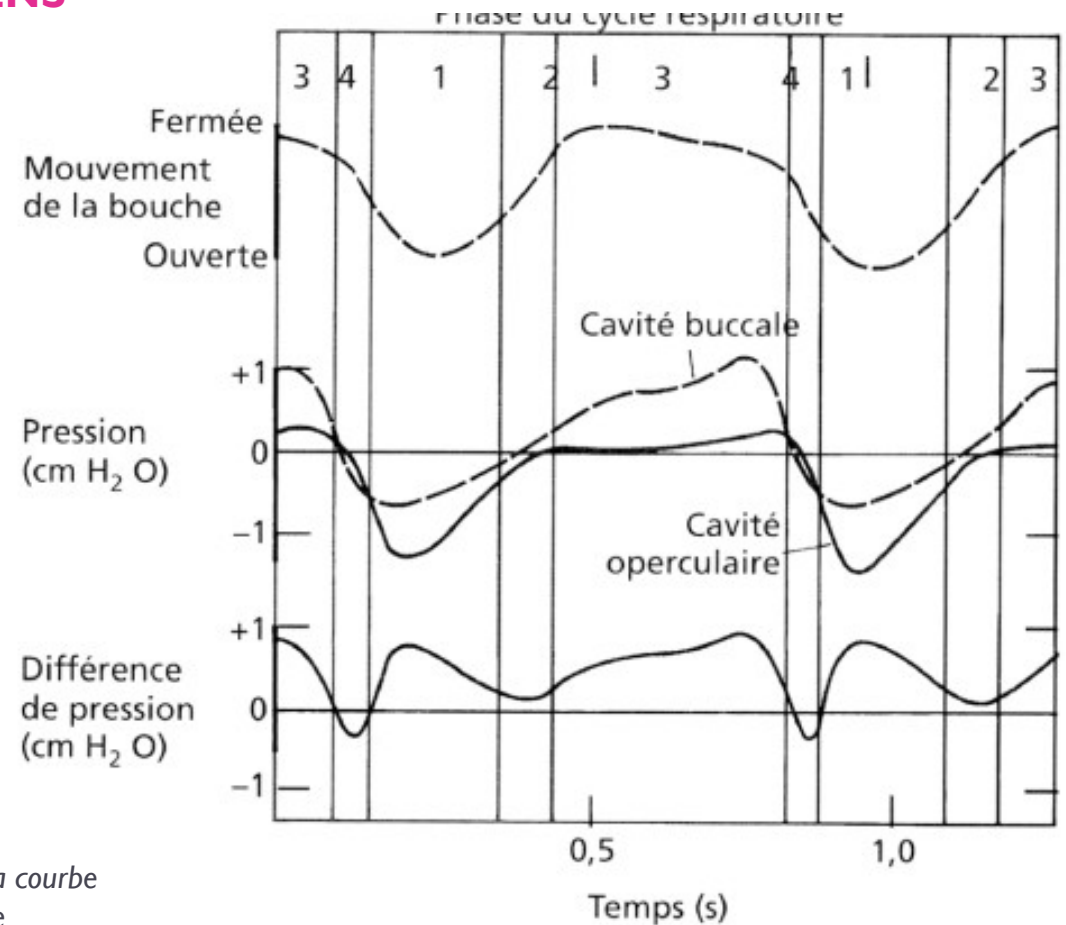
Figure 27 : Mouvements d'eau dans les cavités buccopharyngées (CB) et operculaire (CO) d'un téléostéen (Gilles, 2007)

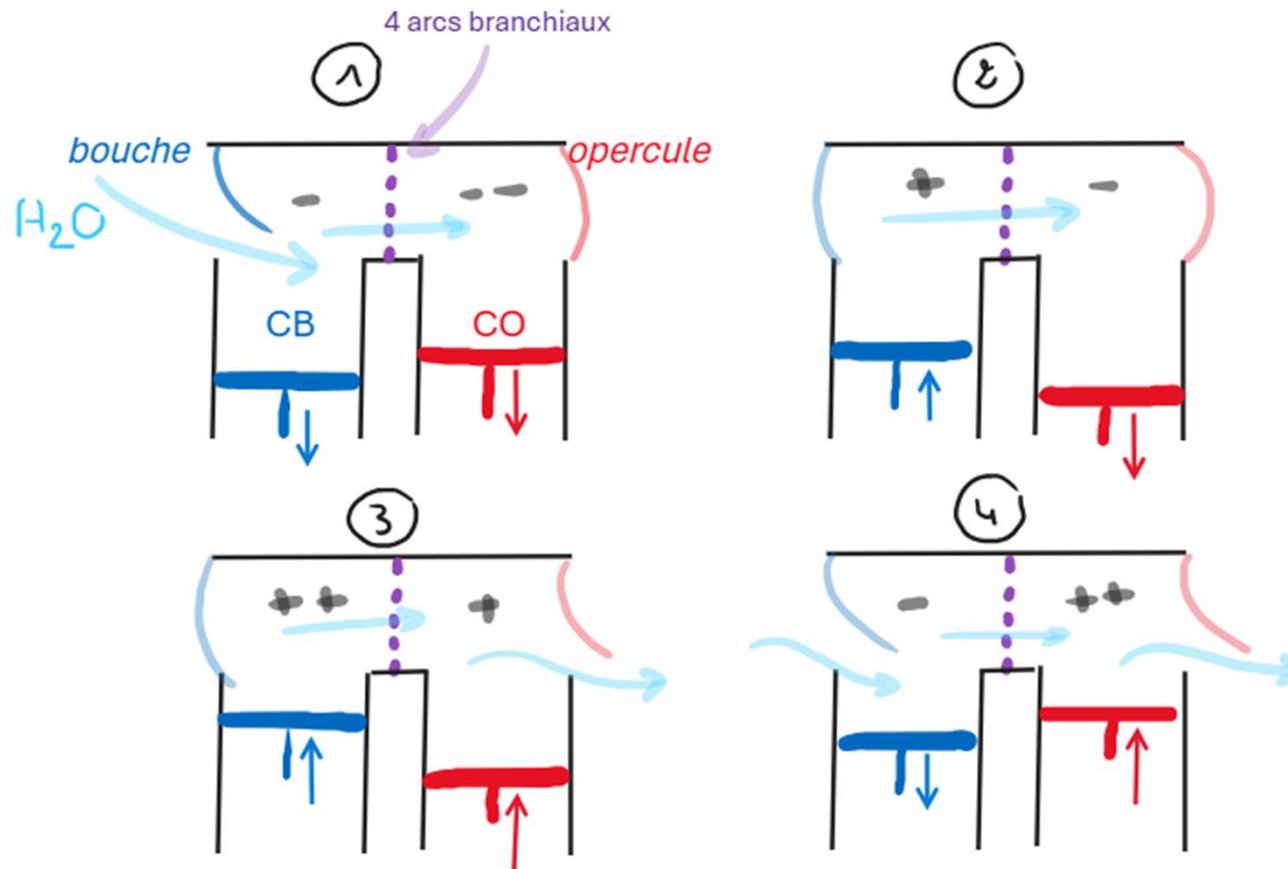
III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION

B. VENTILATION BRANCHIALE DES TÉLÉOSTÉENS



Enregistrement des pressions au niveau de la pompe respiratoire du gardon. La courbe du bas montre la différence de pression entre les cavités buccale et operculaire





Mouvements d'eau dans les cavités buccopharyngées (CB) et operculaire (CO) d'un téléostéen (S. Dalaine)

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION

B. VENTILATION BRANCHIALE DES TÉLÉOSTÉENS

N°	Type d'étape	Cavité buccale	Cavité operculaire	Bouche	Opercule	Pression	Mouvement de l'eau
1	Inspiration	Dilatée	Dilatée	Ouverte	Fermé	$P_{co} < P_{cb} < P_{ext}$	Entrée par la bouche, passage des branchies
2	Inspiration	Contractée	Dilatée	Fermée	Fermé	$P_{cb} > P_{co}$	Quitte la cavité buccale, passe par les branchies
3	Expiration	Contractée	Contractée	Fermée	Ouvert	$P_{cb} > P_{co} > P_{ext}$	Sort par les ouïes
4	Expiration	Dilatée	Contractée	Ouverte	Ouvert	$P_{ext} > P_{cb}$	

Tableau : Alternance des étapes de la ventilation chez les téléostéens

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. **Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation**
 - A. **Ventilation pulmonaire chez les Mammifères**
 - B. **Ventilation branchiale chez les Téléostéens**
 - C. **Autres exemples de ventilation**

- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION

C. AUTRES EXEMPLES DE VENTILATION

I. Ventilation chez la Moule



- Eau mise en mouvement par **des cils vibratiles autour des branchies**
- Transfert unidirectionnel depuis le **siphon inhalant** (ventral de part et d'autre du pied) jusqu'au **siphon exhalant** (boutonnière dorsale)

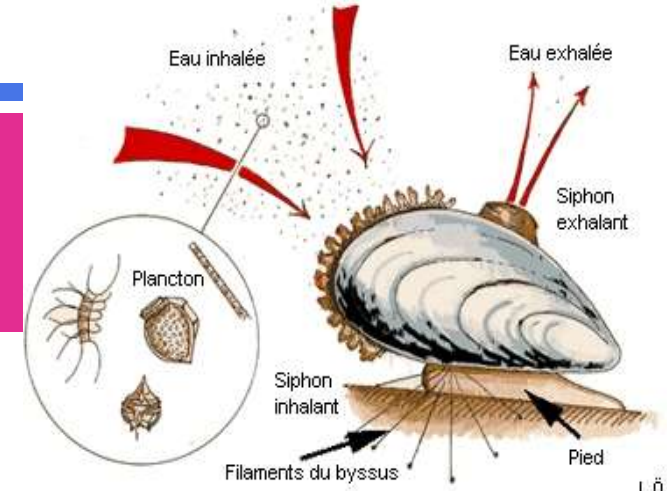
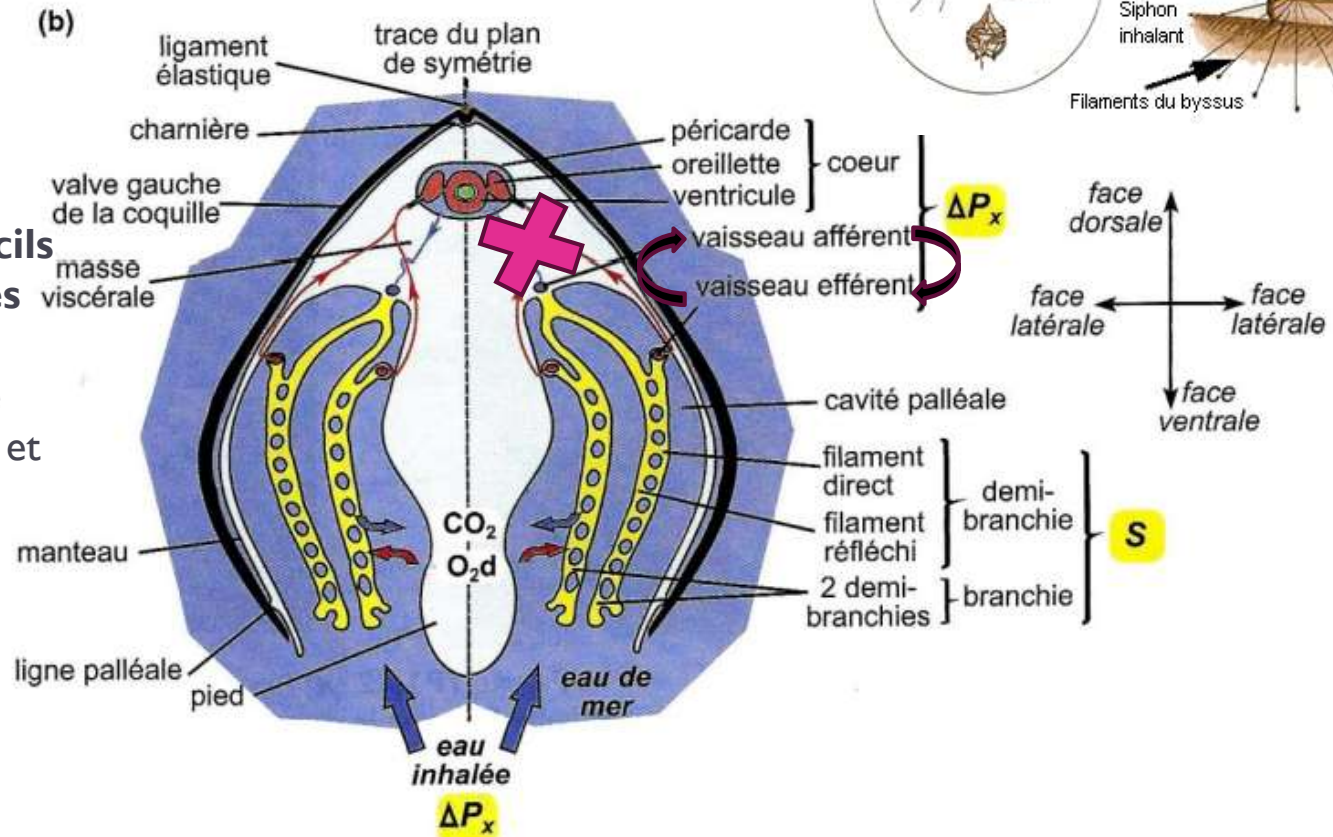
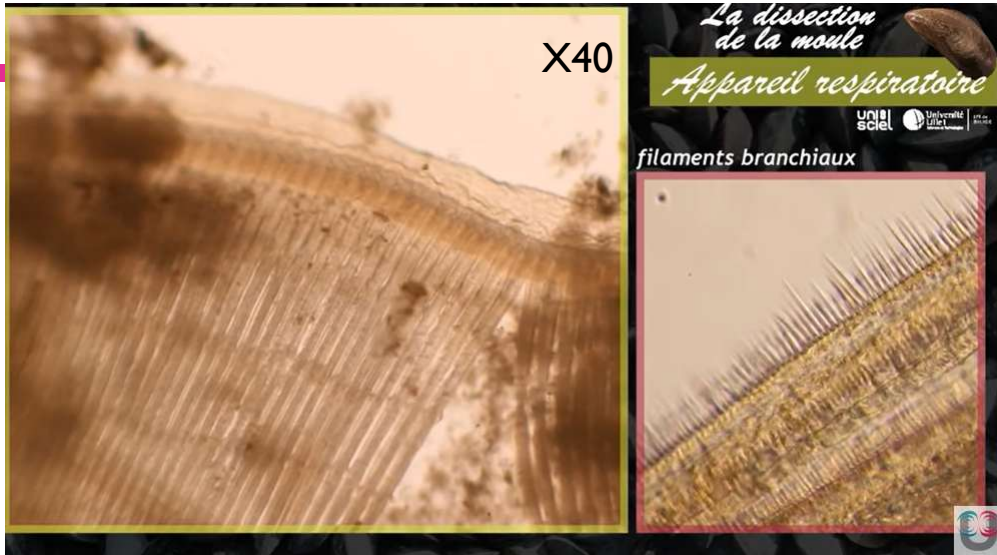


Figure 28 : Ventilation chez la moule (Gilles, 2007)



Des milliers de cils tapissent les filaments branchiaux

I feuillet branchial



Battements ciliaires assurant la circulation de l'eau dans la cavité palléale et les échanges respiratoires entre l'eau et l'hémolymphe irriguant la branchie

X1000



Hémocyte à rôle immunitaire présent dans les lacunes, entraîné par la circulation sanguine



Lacune à hémolymphe

brosses ciliaires

Filaments branchiaux

On « imagine » les cils vibratiles

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION

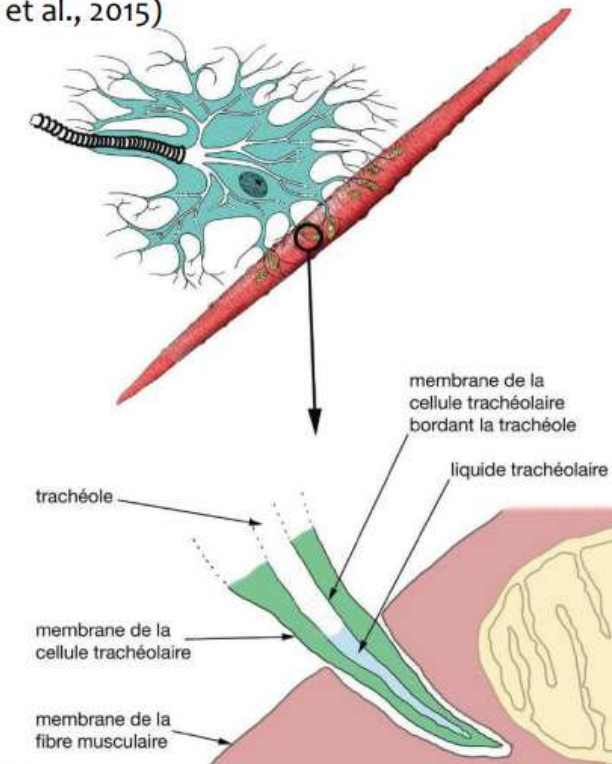
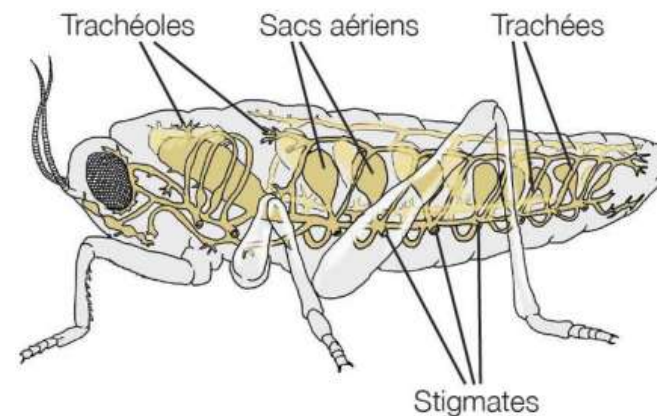
C. AUTRES EXEMPLES DE VENTILATION



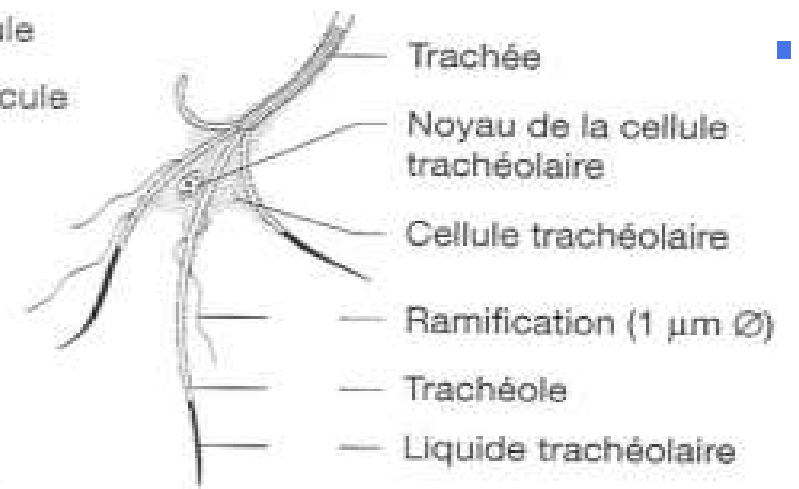
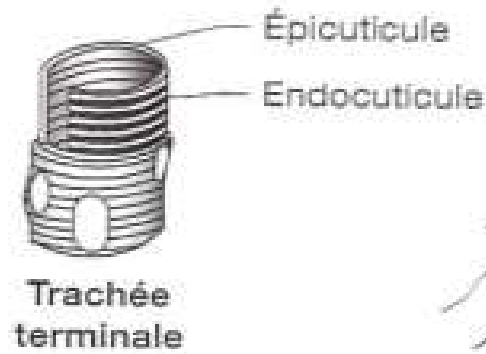
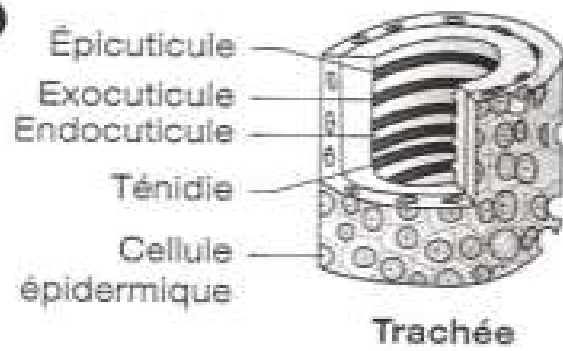
2. Ventilation des trachées des insectes

- **sacs aériens contractiles** → ventilation + réservoirs (*petits et nombreux chez insectes bons voliers tels le Hanneton; peu nombreux et très grands et occupant l'essentiel de cavité abdominale chez Mouche*)
- **mouvement des viscères ou des muscles** → compression des trachées (et les éventuels sacs aériens)
- **inspiration passive** due au relâchement des muscles
- **ouverture ou de la fermeture des stigmates** (= spiracles).
 - ✓ cas des Criquets: stigmates thoraciques et les premiers stigmates abdominaux sont inspirateurs = inhalants alors que les stigmates les plus postérieurs sont expirateurs = exhalants
 - ✓ circulation de l'air **manière unidirectionnelle**

Figure 9 : appareil respiratoire des Insectes
(B. Anselme ; Segarra et al., 2015)



2



3

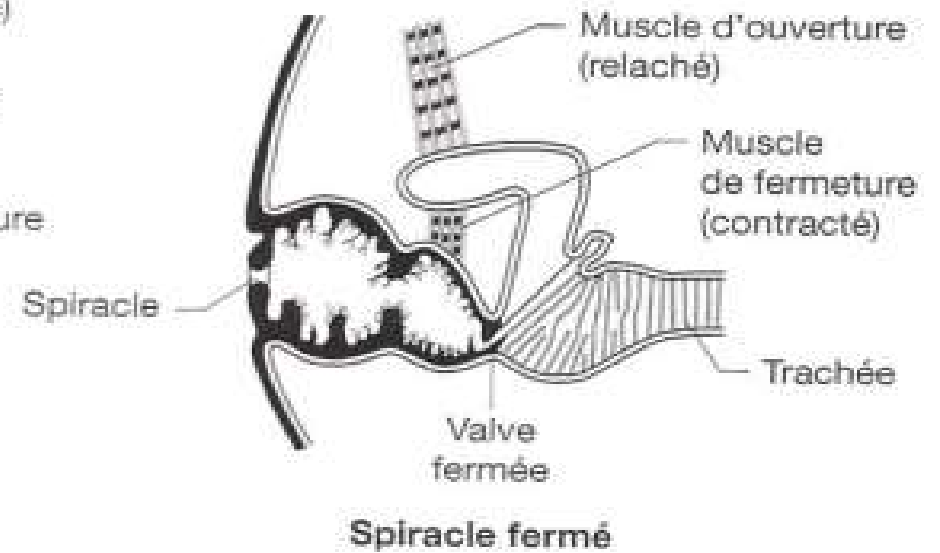
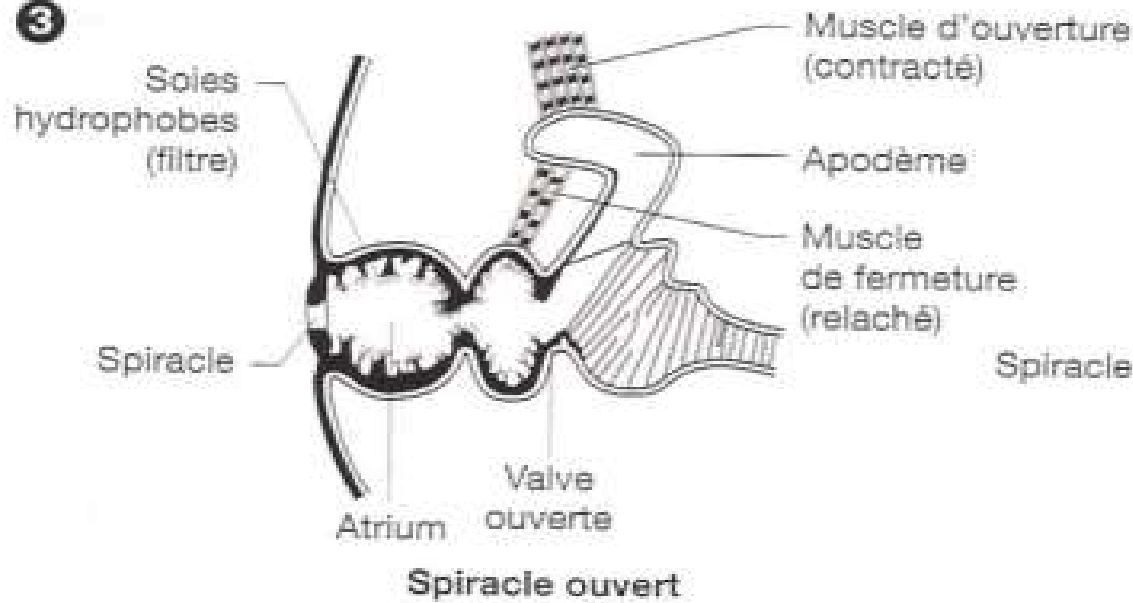


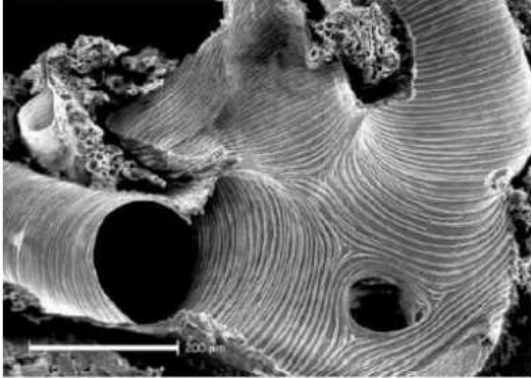
Figure 29 : respiration trachéenne chez les Insectes (d'après Breuil, 2009)

III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION

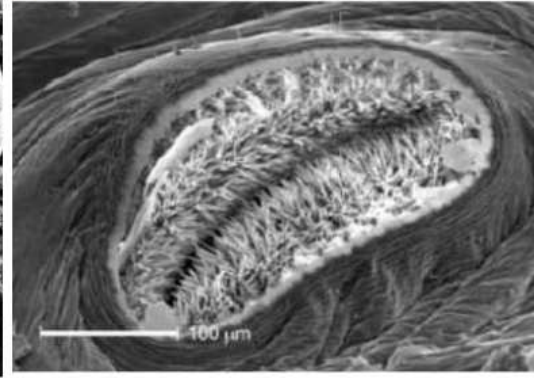
C. AUTRES EXEMPLES DE VENTILATION

2. Ventilation des trachées des insectes

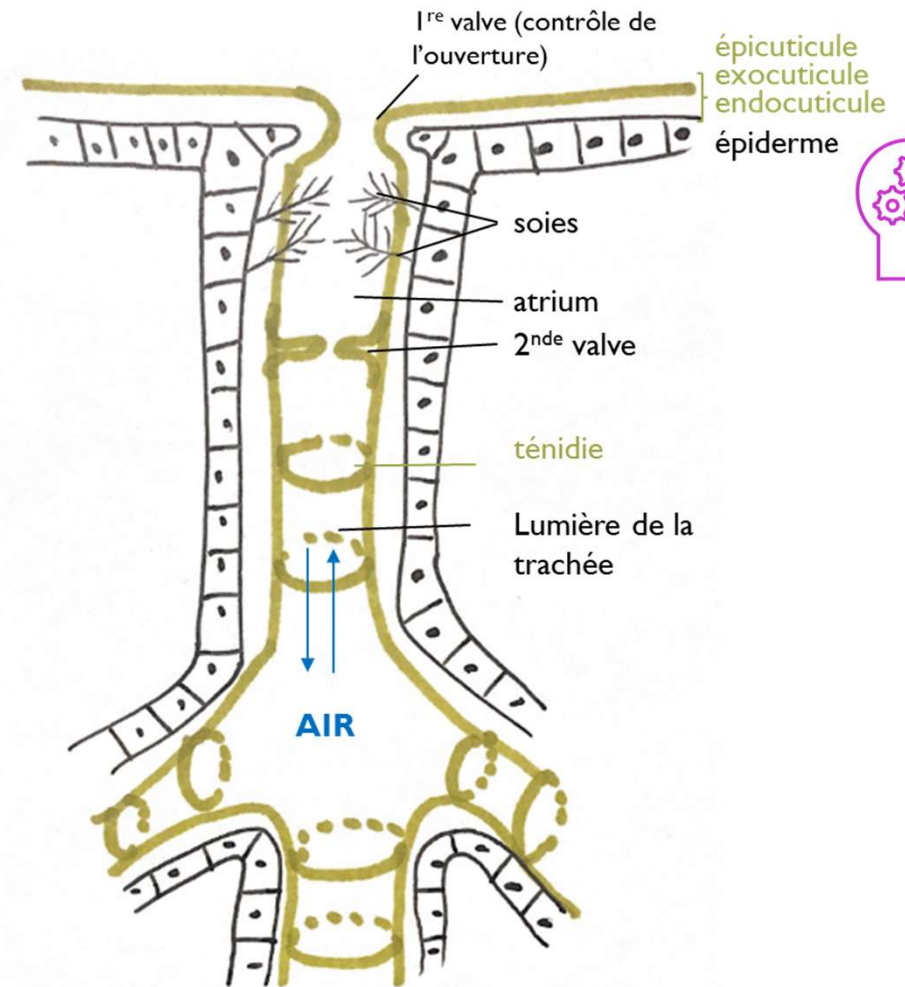
Système trachéen (MEB)



Stigmate (MEB)



- Ouverture contrôlée des stigmates

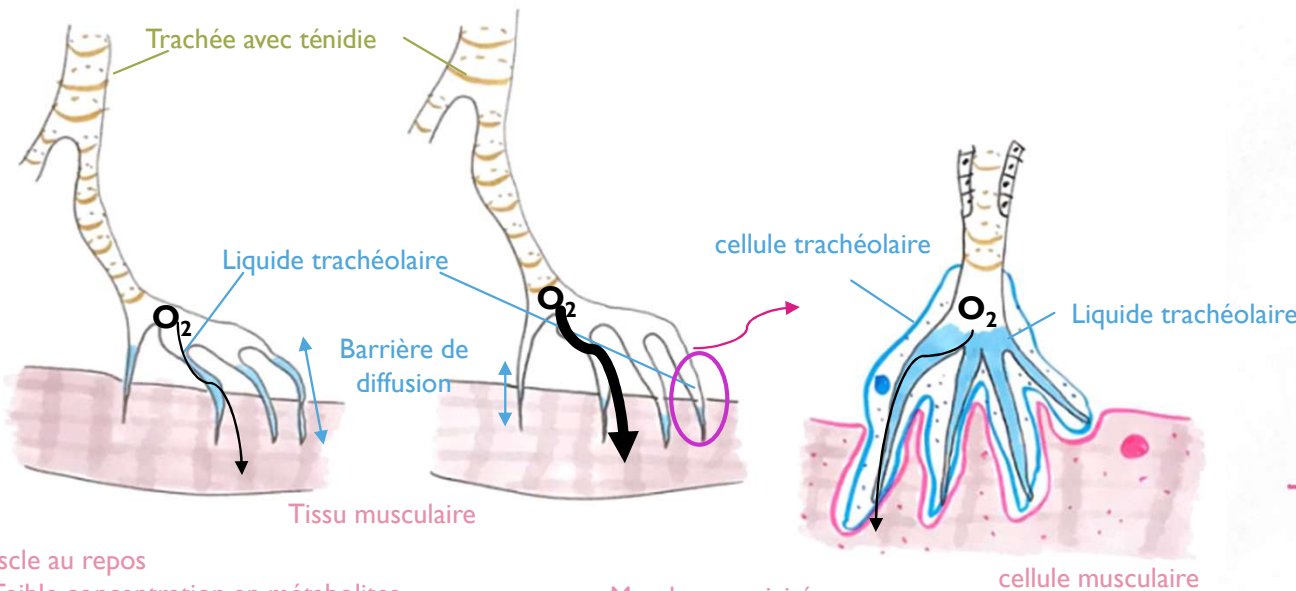


III. MISE EN MOUVEMENT DU MILIEU EXTÉRIEUR : LA VENTILATION

C. AUTRES EXEMPLES DE VENTILATION



2. Ventilation des trachées des insectes



Muscle au repos

- ⇒ Faible concentration en métabolites
- ⇒ Faible pression osmotique
- ⇒ Potentiel hydrique peu < 0

Muscle en activité

- ⇒ Forte concentration en métabolites
- ⇒ Forte pression osmotique (faible potentiel osmotique)
- ⇒ Potentiel hydrique << 0
- ⇒ Mouvement d'eau de la trachéole vers le tissu
- ⇒ Diffusion de O_2 de trachéole vers tissu

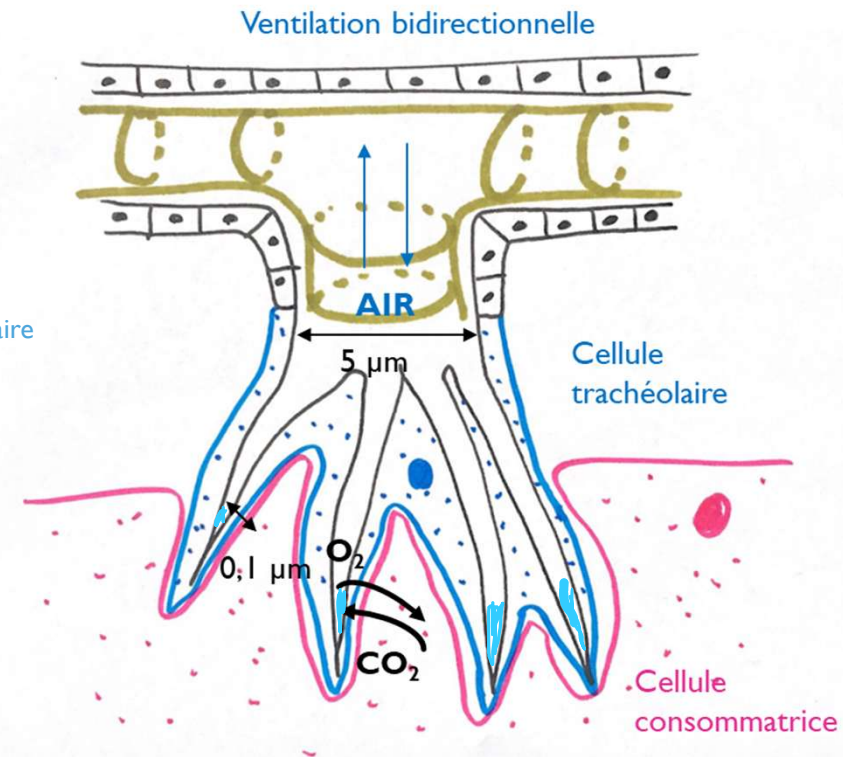


Figure 30 : diffusion du dioxygène des cellules trachéolaires vers les cellules consommatrices (S. Dalaine)

BILAN SUR LES STRUCTURES RESPIRATOIRES EN MILIEU AÉRIEN



- En comparant les structures respiratoires en milieu aérien, on peut souligner :
 - Des structures **localisées** (poumons) ou **diffuses** dans l'organisme (trachées)
 - Des structures **invaginées**, soutenues facilement et protégées de la déshydratation du milieu peu porteur et desséchant
 - Des structures de **surface importante**, améliorant le flux de diffusion (cf Loi de Fick)
 - Des structures d'**épaisseur faible**, améliorant le flux de diffusion (cf Loi de Fick)
 - Permettant une perméabilité des gaz, par la présence d'une interface liquidienne
 - Généralement richement vascularisées

Caractéristiques du milieu	Conséquences sur les échangeurs respiratoires
<p>Faible portance du milieu <i>(La poussée d'Archimède exercée par l'air est négligeable par rapport au poids des organismes)</i></p>	<p>Échangeurs souvent <u>invaginés</u> (<u>poumons</u>, <u>trachées</u>) (à l'intérieur de la ligne du corps), <u>portés</u> et <u>protégés</u> par des structures rigides de l'organisme (squelette).</p>
<p>Densité faible du milieu <i>(800 fois moins que l'eau)</i></p>	<p>Milieu dont la mise en mouvement (ventilation) nécessite beaucoup moins d'énergie que l'eau : circulation bidirectionnelle possible.</p>
<p>Milieu très desséchant <i>(= Principale contrainte du milieu aérien)</i></p>	<p>Risque de déshydratation important</p> <p><i>Solutions adoptées :</i></p> <p>a) Échangeurs souvent invaginés (dont la surface est moins exposée aux fluctuations du milieu de vie que s'ils étaient évaginés)</p> <p>b) Nombreux mécanismes de maintien de l'équilibre hydrique permettant de limiter et de compenser les pertes d'eau liées à la respiration.</p> <p>Nécessité d'une présolubilisation des gaz respiratoires</p>
<p>Forte disponibilité en dioxygène <i>(Il y a en moyenne 30 fois plus de dioxygène dans l'air que dans l'eau)</i></p>	<p>Maintien d'un différentiel de pression partielles entre milieu interne et milieu externe beaucoup plus aisé qu'en milieu aquatique.</p>

L'équilibre hydrominéral des Animaux est hors programme, sauf excrétion humaine.

Le milieu aérien : contraintes et solutions

Sources: Tanguy Jean

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne**
 - A. Echanges avec le liquide circulant**
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

IV. DIVERSITÉ DES MODES DE CONVECTION INTERNE

La mise en mouvement du milieu extérieur permet ainsi le renouvellement des gaz sanguins du milieu. Dans l'organisme, les échanges font parfois intervenir la mise en mouvement du milieu intérieur par un système spécialisé, **le système circulatoire**.

Abordons maintenant la diversité de ces systèmes circulatoires, ainsi que leurs liens avec les échanges de gaz respiratoires.

IV. DIVERSITÉ DES MODES DE « CONVECTION » INTERNE

A. ECHANGES AVEC LE LIQUIDE CIRCULANT

liquides circulants (sang ou hémolymphe) = **matrice extracellulaire liquide** + **cellules** en suspension (il s'agit d'un **tissu conjonctif**).

- Deux types de liquides circulants selon le plan d'organisation :
 - **sang** (téléostéens et mammifères): **appareil circulatoire fermé**.
 - ✓ Chez Vertébrés : sang liquide de couleur rouge
 - ✓ centrifugation de sang additionné de substances anti-coagulantes → **plasma**, liquide jaune clair + **leucocytes** et de **plaquettes sanguines** + un culot de **globules rouges** ou **hématies**.
 - **Hémolymphe** (moule , insectes) : **système ouvert**
 - ✓ **Circulation dans** vaisseaux et dans lacunes (non limitées par un endothélium)
- un **système circulatoire clos** (ou fermé) lorsque le liquide circulant (sang) est complètement endigué dans des vaisseaux.
- **système circulatoire ouvert** lorsque le liquide circulant est en partie endigué dans des vaisseaux qui se déversent à un moment dans le liquide de la cavité générale. Il y a donc un même liquide qui est à la fois liquide circulant et liquide interstitiel : **l'hémolymphe**.

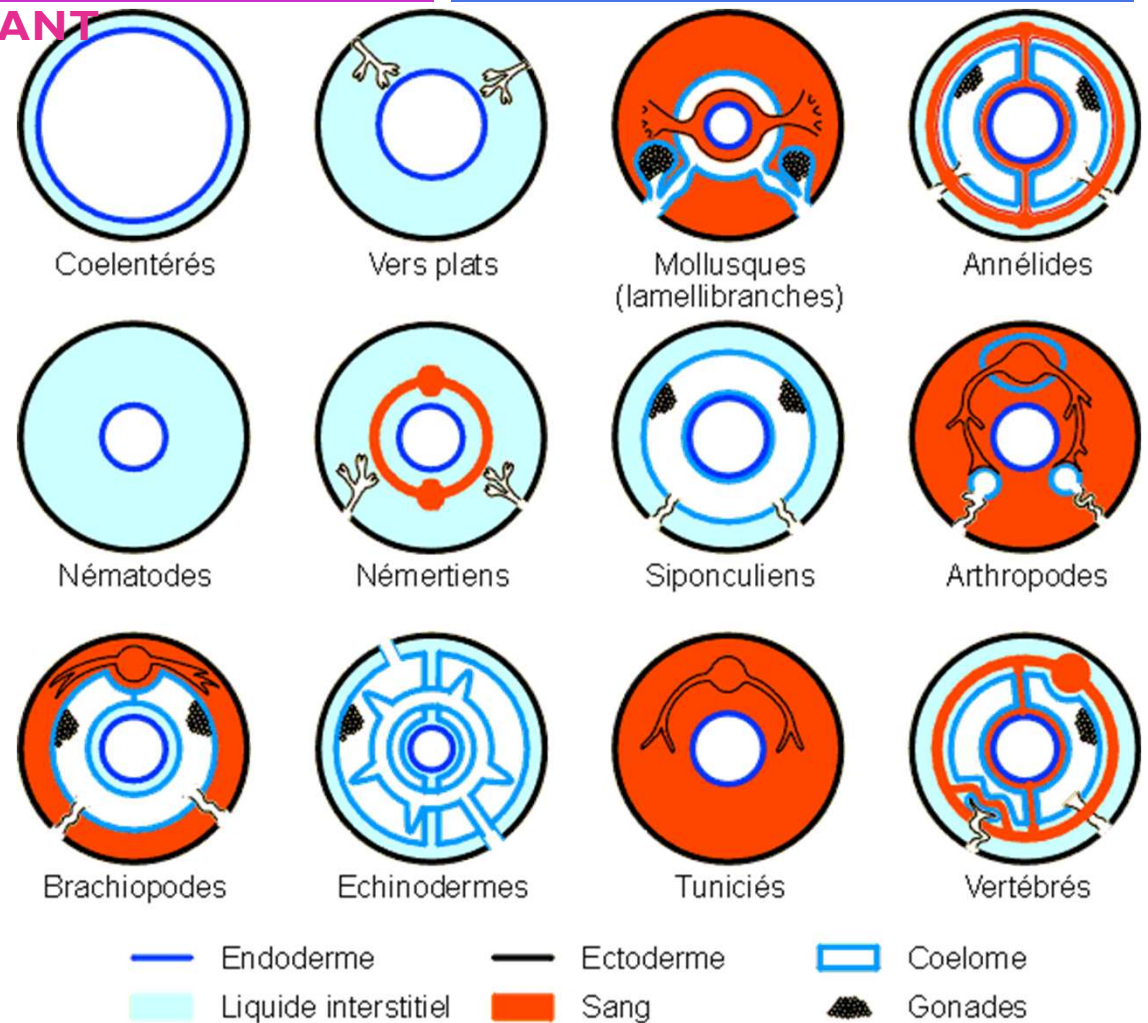


Figure 31 : Compartiments des métazoaires <http://coproweb.free.fr/pagphy/physioan/ch1s1.htm>

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne**
 - A. Echanges avec le liquide circulant**
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires**

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

IV. DIVERSITÉ DES MODES DE « CONVECTION » INTERNE

B. DIVERSITÉ DES COMPARTIMENTS ET SYSTEMES CIRCULATOIRES

2. Organisation des systèmes circulatoires

Système cardiovasculaire ouvert ou clos

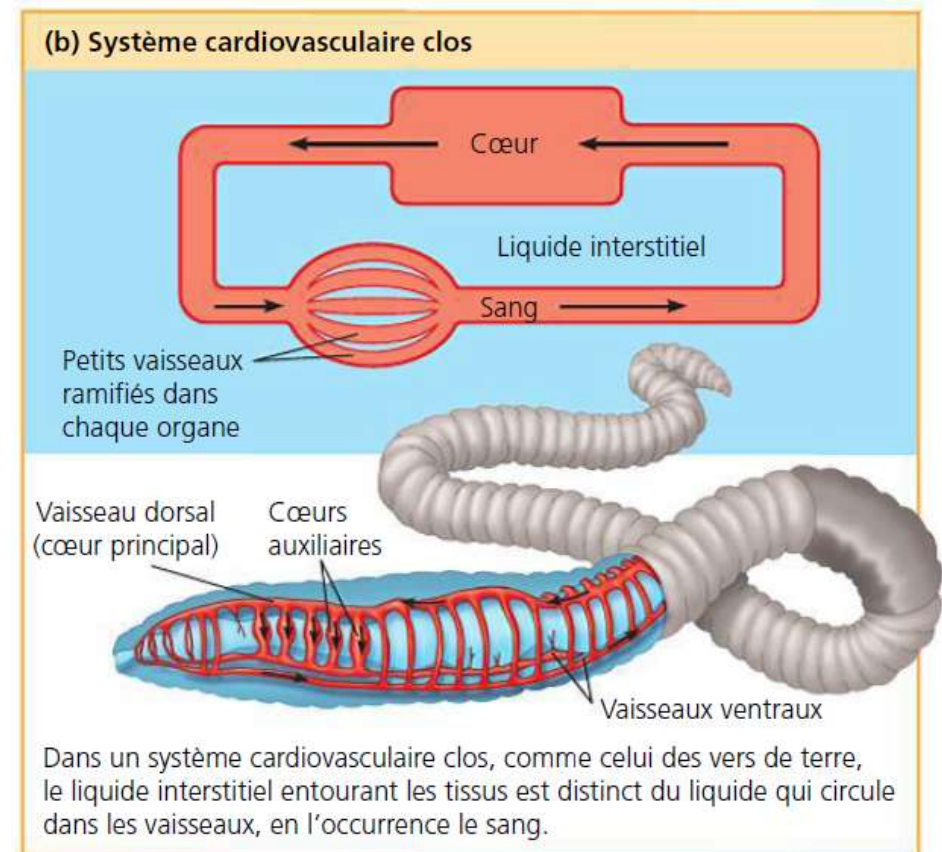
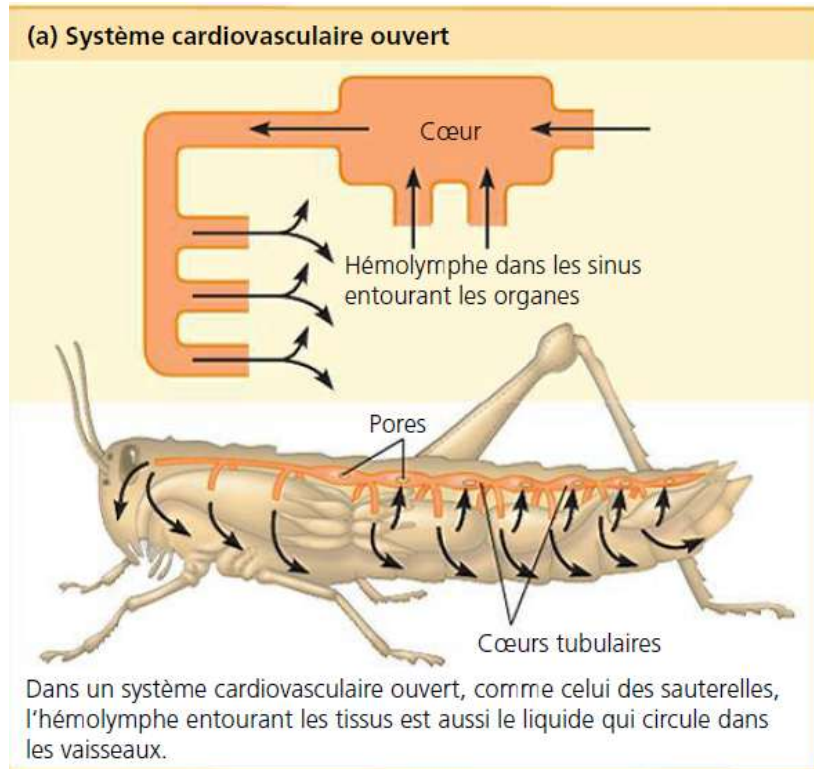


Figure 32: Systèmes cardiovasculaires ouverts et fermés (Campbell, 2012)

IV. DIVERSITÉ DES MODES DE « CONVECTION » INTERNE

B. DIVERSITÉ DES COMPARTIMENTS ET SYSTEMES CIRCULATOIRES



2. Organisation des systèmes circulatoires

Circulation simple ou double

- **Téléostéens** : un seul circuit, et un cœur (organe contractile responsable de la mise en mouvement du sang)
 - **deux cavités** (ou chambres) : une oreillette, puis un ventricule.
 - **cœur** : **sang pauvre en dioxygène**, envoyé dans les branchies pour être oxygéné
- **Mammifères: double circulation**
 - **petite circulation** (pulmonaire), basse pression → oxygénation du sang au passage des poumons
 - **Grande circulation** à haute pression; approvisionnement des organes en sang oxygéné
 - par 4 cavités : atrium et ventricule
 - 2 demi-cœurs

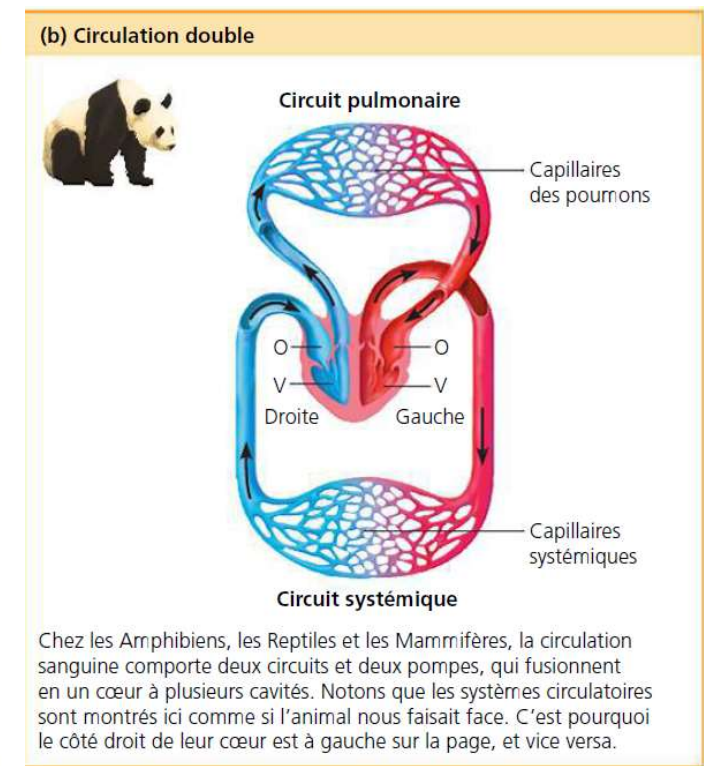
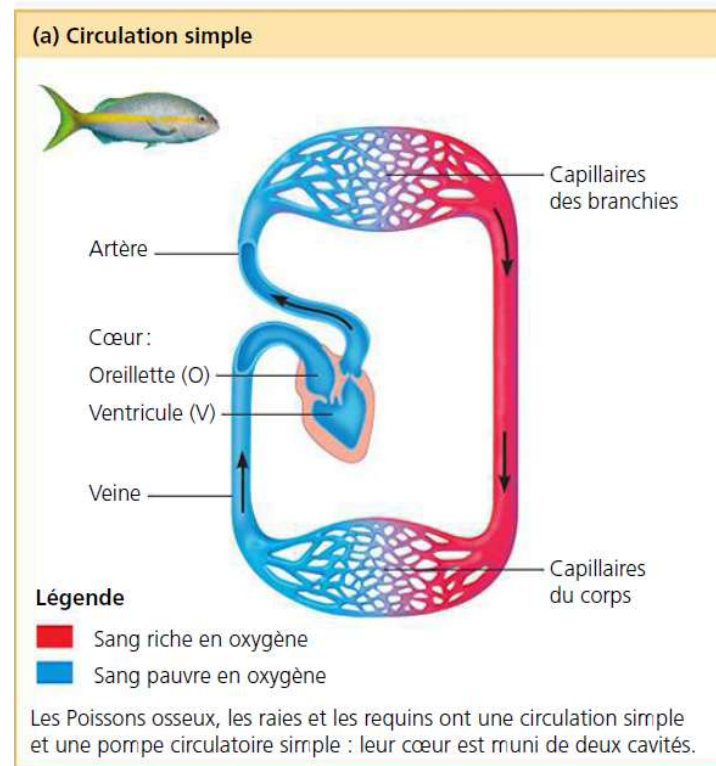
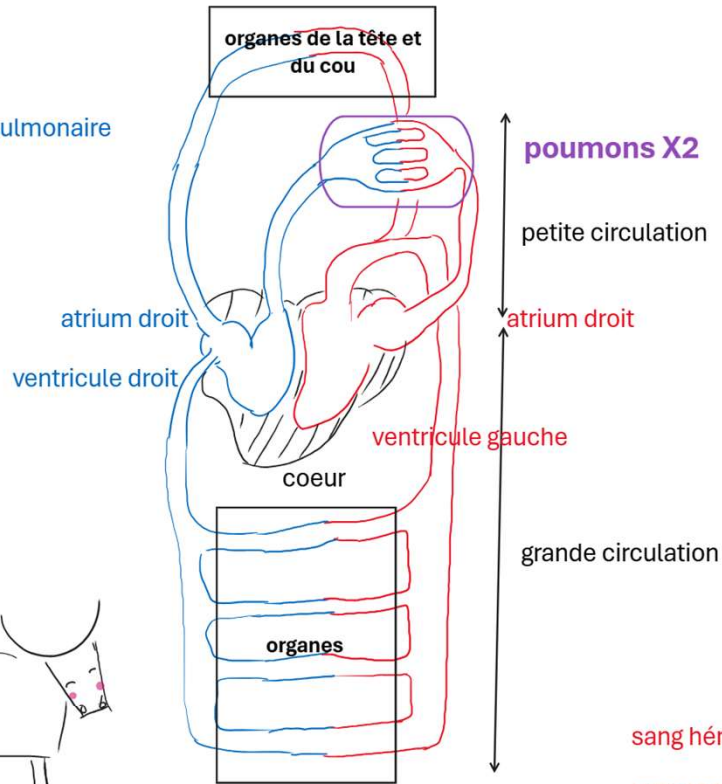
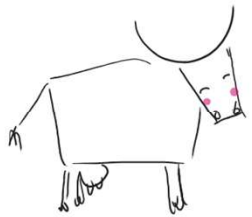
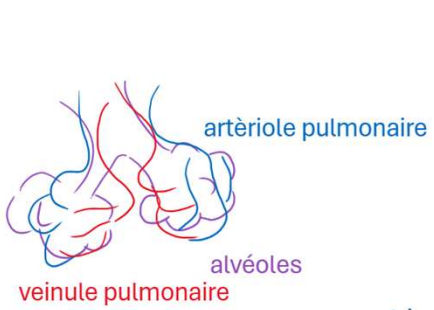
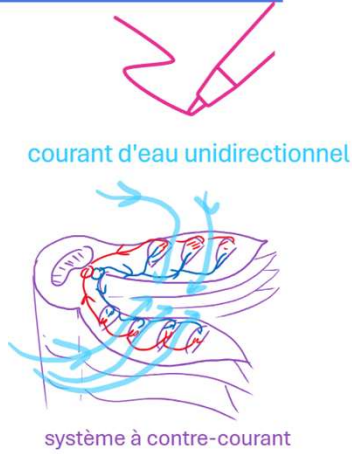
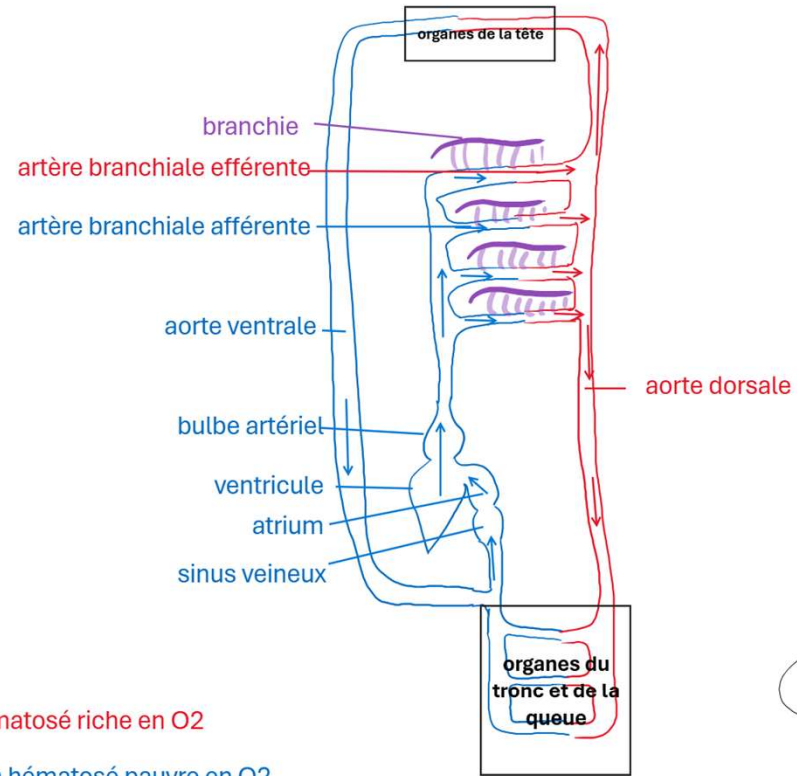


Figure 33: Circulation simple ou double (Campbell, 2012)



sang hématosé riche en O₂
 sang non hématosé pauvre en O₂
 et enrichi en CO₂

circulation sanguine chez deux vertébrés

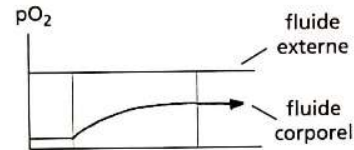
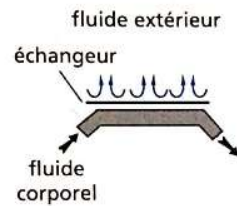


B. DIVERSITE DES COMPARTIMENTS ET SYSTEMES CIRCULATOIRES

3. Diffusion des gaz respiratoires au niveau des surfaces d'échanges

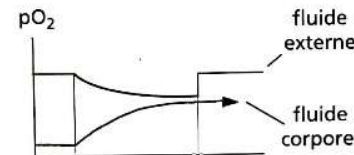
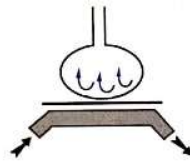
Respiration tégumentaire et trachéenne

Ex : arénicole



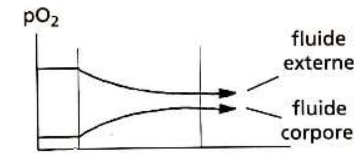
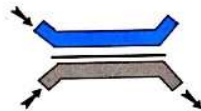
Respiration pulmonaire

Ex : mammifères



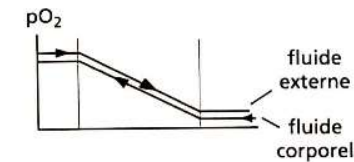
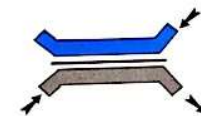
Respiration branchiale externe

Ex : moule, écrevisse, langoustine



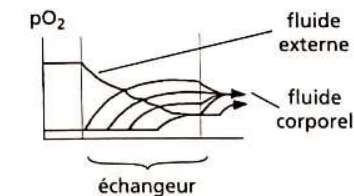
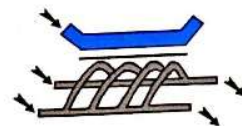
Respiration branchiale interne

Ex : téléostéens



Respiration en sacs aériens (poumon tubulaire)

Ex : oiseaux



Comparaison des courants d'échange respiratoires



Ventilation bidirectionnelle avec travail ventilatoire faible (milieu aérien peu dense et peu visqueux)

Ventilation unidirectionnelle avec travail ventilatoire modéré
Système concourant

Ventilation unidirectionnelle avec travail ventilatoire fort
Système à contre-courant

Ventilation unidirectionnelle avec travail ventilatoire assuré par des structures différentes de celles impliquées dans les échanges gazeux
Multi système à concourant

B. DIVERSITE DES COMPARTIMENTS ET SYSTEMES CIRCULATOIRES

3. Diffusion des gaz respiratoires au niveau des surfaces d'échanges

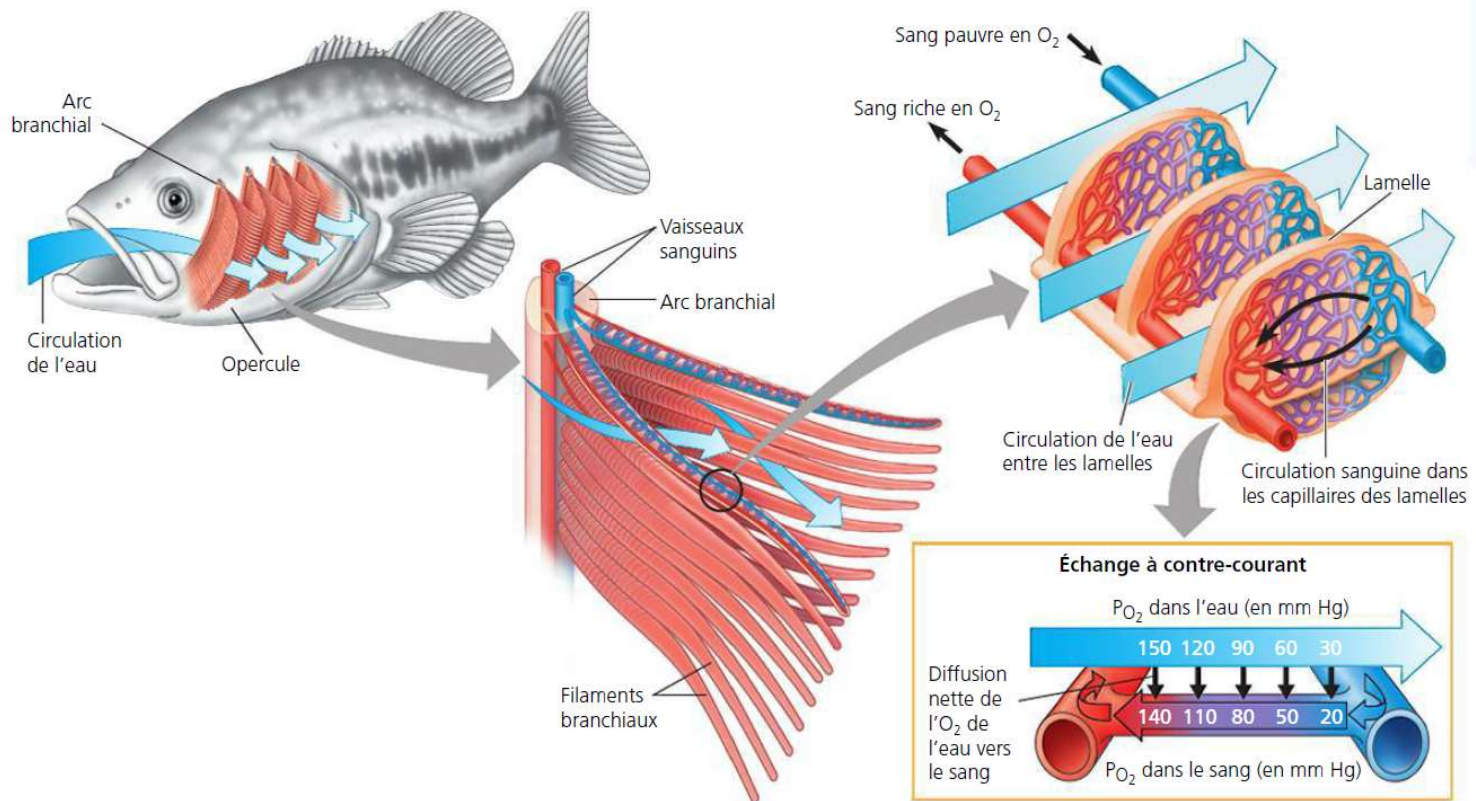


Figure 35 : Ventilation branchiale chez les téléostéens et échange à contre-courant (Campbell, 2012)

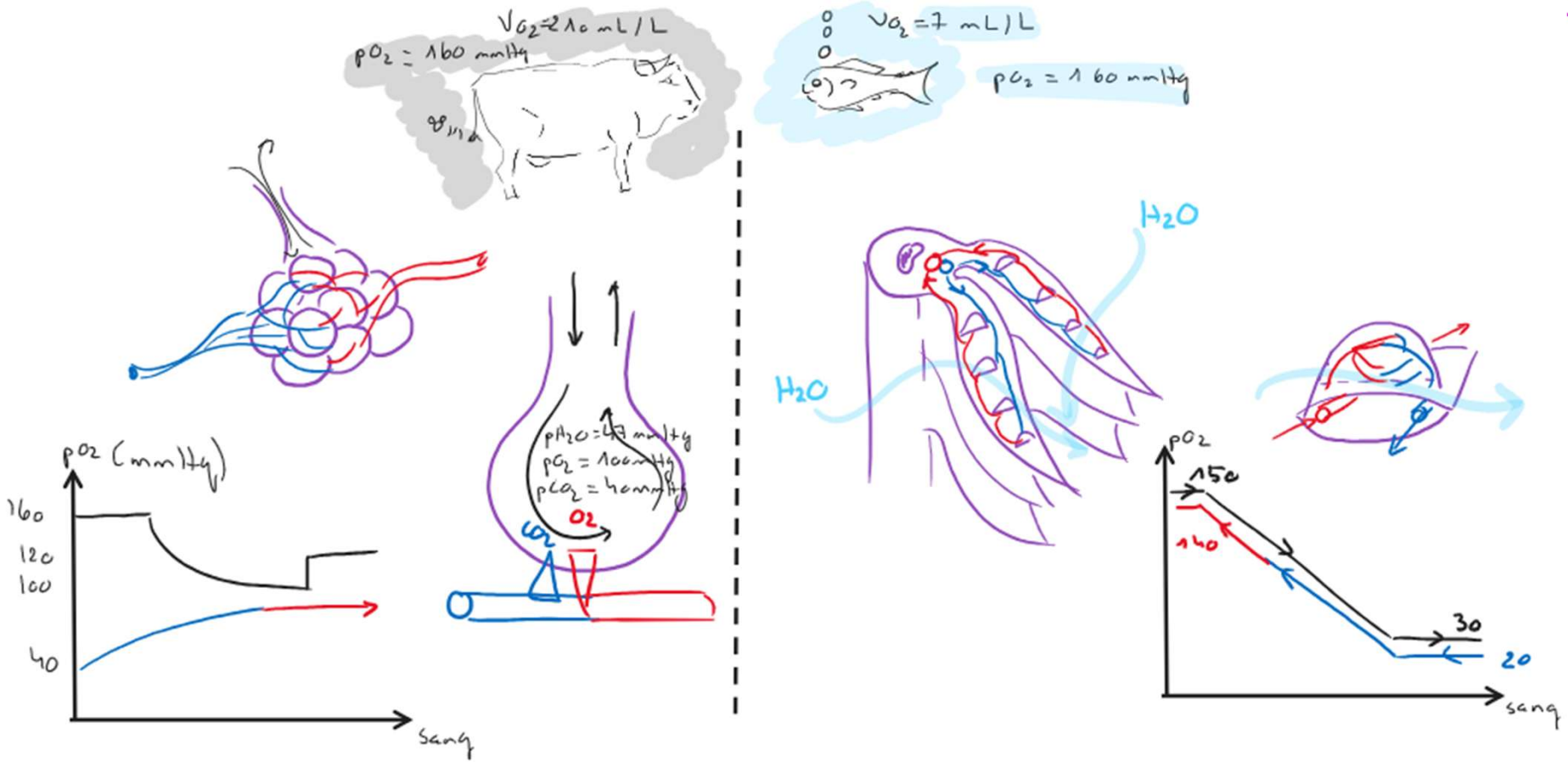
$$J = -D \cdot S \cdot \left(\frac{\Delta P}{e}\right)$$

J = flux de gaz ou débit de diffusion (mol.s⁻¹) ou vitesse de diffusion du gaz

S = surface d'échanges (m²)

D (ou K) = constante de diffusibilité de Krogh du gaz (mol.s⁻¹.m⁻¹.Pa⁻¹)

ΔP = différence de pression partielle entre les deux compartiments (Pa)



Comparaison de l'entretien du gradient de PO₂ entre le poumon alvéolaire des Mammifères et la branchie du Téléostéen: système bidirectionnel vs contre-courant

(S. Dalaine)

PLAN

- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien

- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien

- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation

- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires

- V. Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères**
 - A. Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires**
 - B. Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères

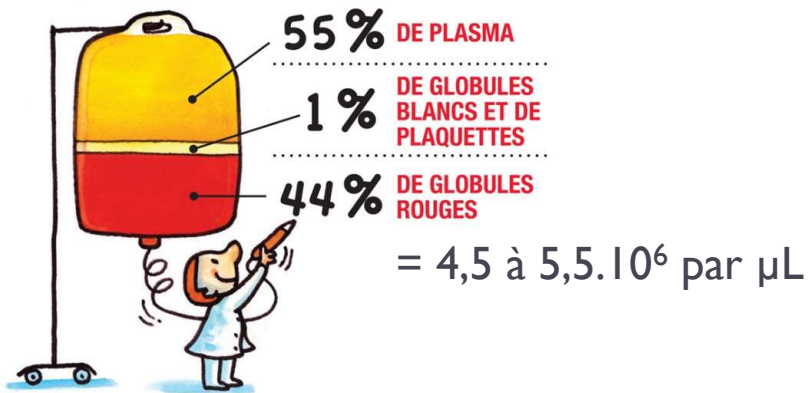
V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

Nous avons vu qu'au niveau des surfaces d'échange respiratoires, les gaz respiratoires diffusaient vers les systèmes circulatoires, notamment vers les vaisseaux contenant du sang chez les mammifères. Comment ce sang transporte-t-il les gaz respiratoires ?

V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

I. Le sang, un liquide contenant de nombreuses hématies

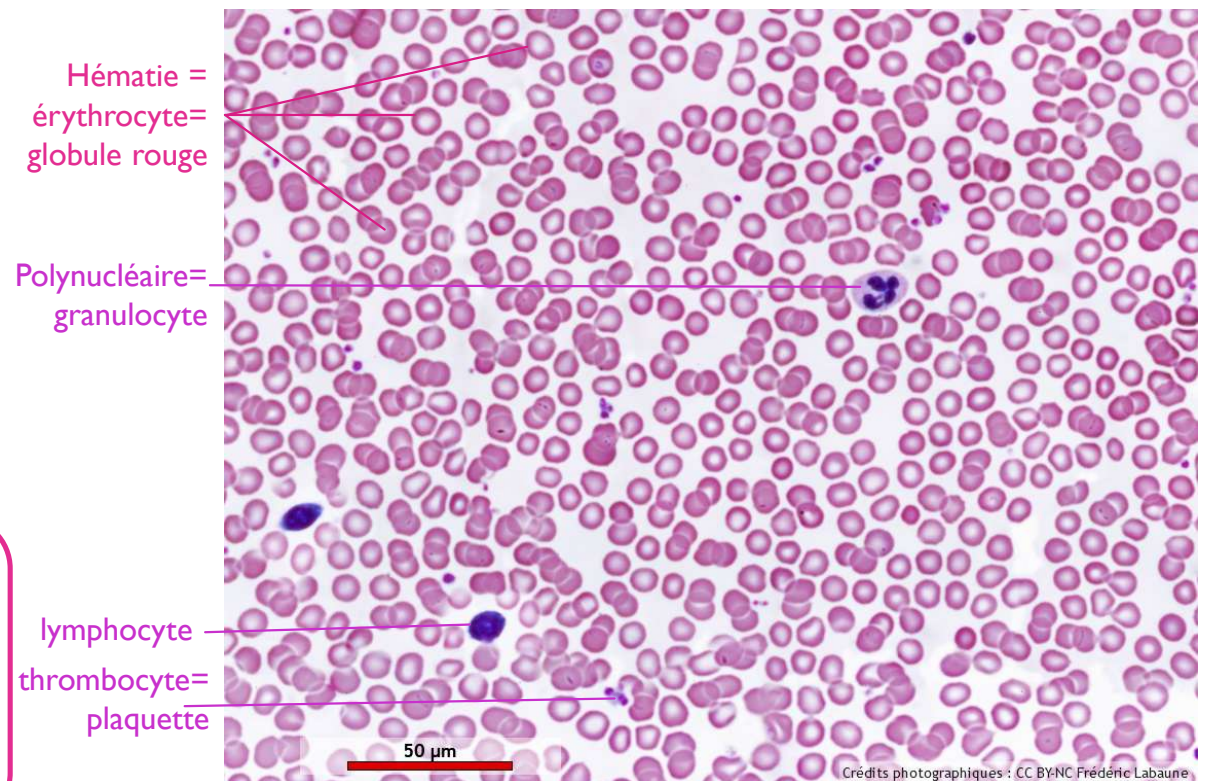


Sang = plasma + cellules

Plasma = sérum + fibrinogène

⇒ Plasma obtenu par centrifugation du sang avec anticoagulant (EDTA, héparine)

⇒ Sérum obtenu par centrifugation du sang sans anticoagulant



V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

2. Les hématies, cellules spécialisées dans le transport des gaz respiratoires

= Erythrocyte ou globule rouge

- Cellule **sans noyau** à dépression centrale = **biconcave**
- Produites en permanence par **moelle osseuse hématopoïétique**
- Durée de vie **120 jours** (recyclage dans rate)
- Protéines et glycoprotéines membranaires spécifiques (chargées moins)
- **Fermentation lactique** (pas de mitochondrie!)
- Riche en hémoglobines (**250 millions Hb/hématie**)
- Hématocrite : quantité d'hématies par unité de volume (détection anémie)

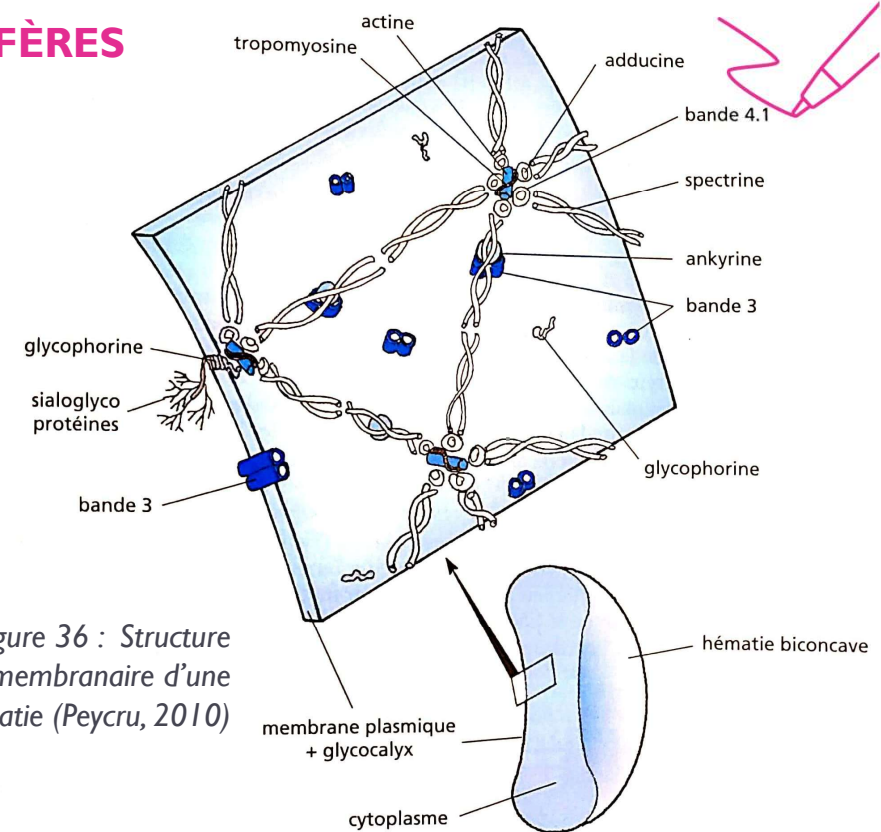
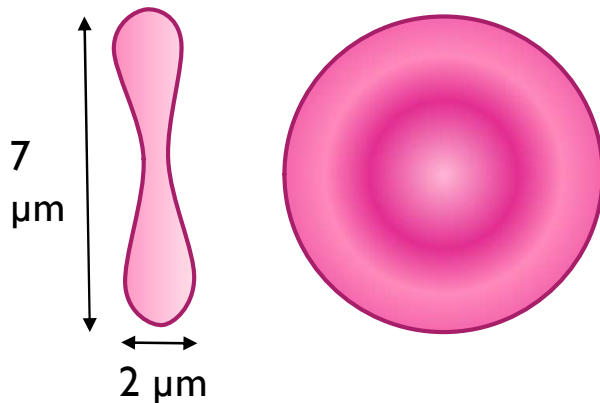


Figure 36 : Structure membranaire d'une hématie (Peycru, 2010)

- Fantôme d'hématies (rappel milieu hypotonique)
- **Glycocalyx** (cf groupe ABO)
- Protéines de la bande 3 (traverse 12 fois la mb plasmique!): Cl^- , HCO_3^-
- **Spectrine**: fibres de 100 nm de , diamètre de deux chaînes antiparallèles
 - Rôle majeur dans forme biconcave et capacité de déformation

V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES



3. L'hémoglobine, une protéine impliquée dans le transport des gaz respiratoires

- Protéine **tétramérique**: 4 sous-unités : 2 globines α et 2 globines β (assemblage $\alpha 1 - \beta 1$ et $\alpha 2 - \beta 2$)
 - Chaque globine: **1 hème** (groupe prosthétique= unité non polypeptidique) (Fe^{2+} ferreux)
 - Hème = protoporphyrine (4 cycles pyrrole) accueillant au centre un atome de **Fer ferreux** lié à quatre atomes d'azote
 - **$\text{Fe}^{2+} = 6$ positions de coordination...**
 - ✓ **4 liaisons avec hème**
 - ✓ **1 liaison avec aa (histidine F8 proximale)**
 - ✓ **1 liaison disponible pour O_2**
- 3 formes de Hb
 - DésoxyHb (6^e position de coordination vide)
 - OxyHb (6^e position de coordination occupée par O_2)
 - Ferrihémoglobine (Fe^{3+}) (methémoglobine) (seulement 5 positions de coordination => impossibilité de fixer O_2)

■ **4 molécules d' O_2 fixées par Hb:**



BCPSTI-ENCPB-STEPHANIE DALAINE

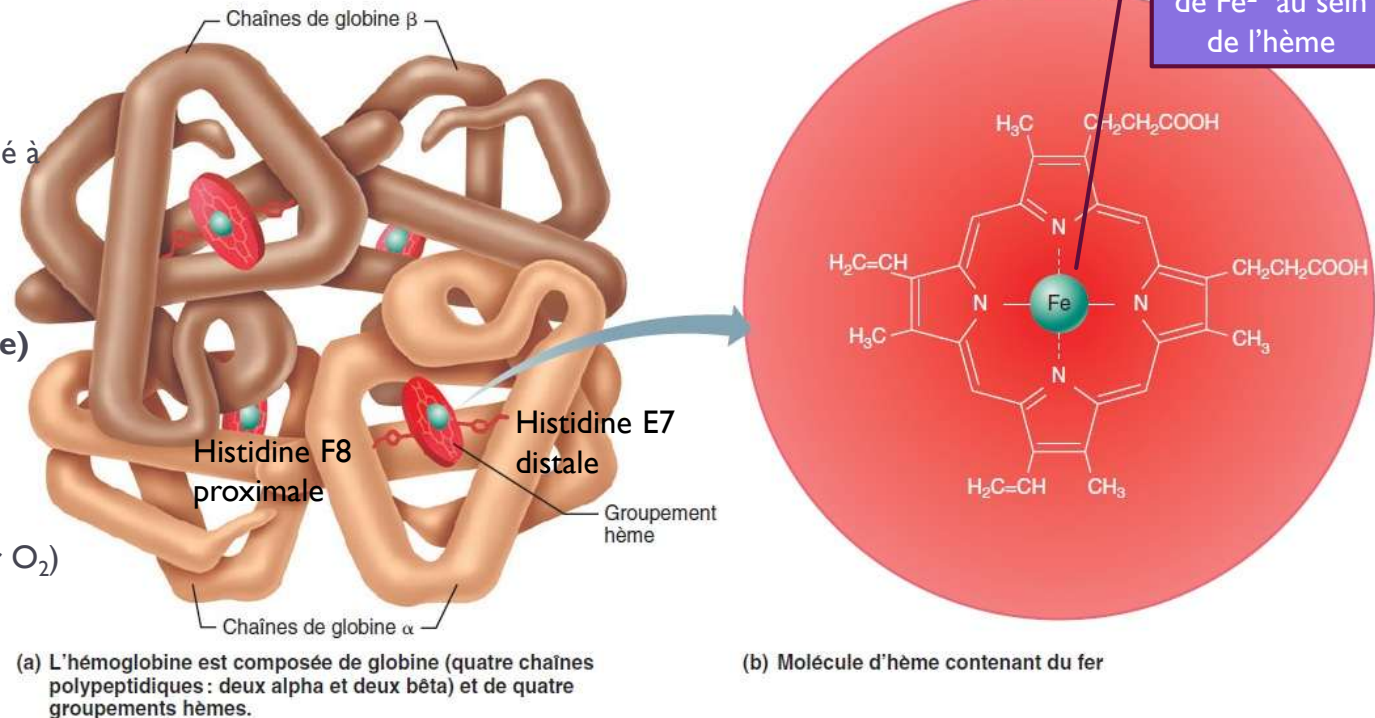


Figure 37 : Structure tridimensionnelle de l'hémoglobine (a) et de l'hème (b)

V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

3. L'hémoglobine, une protéine impliquée dans le transport des gaz respiratoires

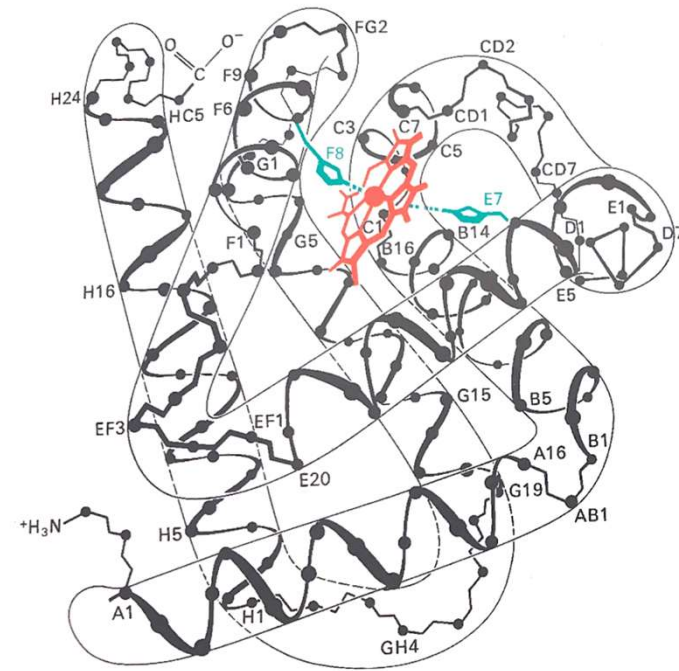


Figure 7-4
Modèle de la myoglobine à haute résolution. Seuls les atomes de carbone α sont représentés. Le groupe hème est représenté en rouge et les deux résidus histidine clé en vert. [D'après R.E. Dickerson. In *The Proteins*, vol. 2, 2nd ed., H. Neurath, ed. (Academic Press, 1964), p. 634.]

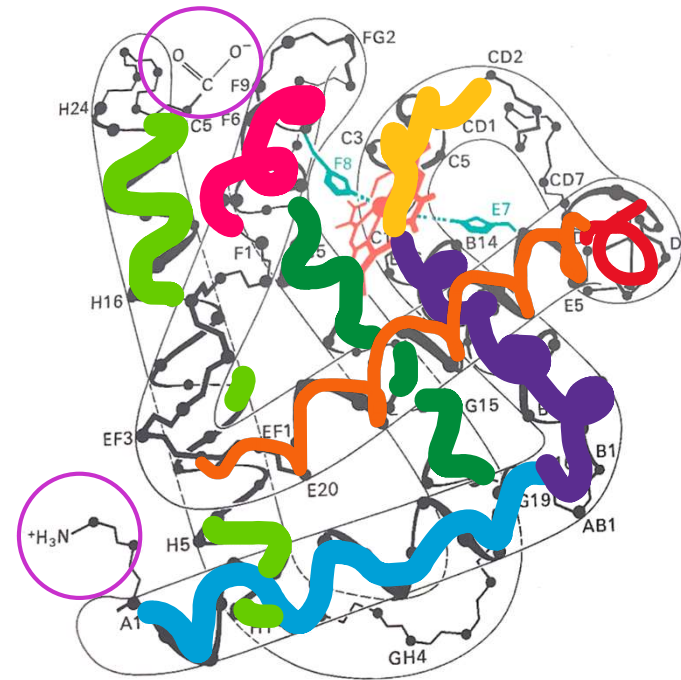


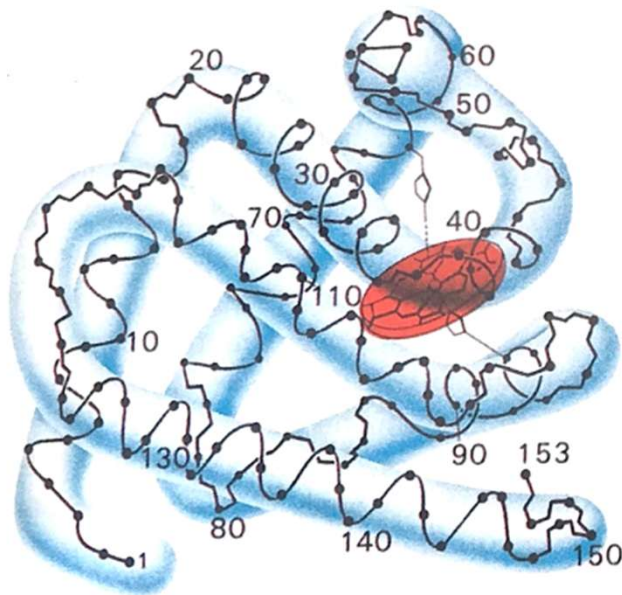
Figure 7-4
Modèle de la myoglobine à haute résolution. Seuls les atomes de carbone α sont représentés. Le groupe hème est représenté en rouge et les deux résidus histidine clé en vert. [D'après R.E. Dickerson. In *The Proteins*, vol. 2, 2nd ed., H. Neurath, ed. (Academic Press, 1964), p. 634.]

Figure 38 : Modèle de la myoglobine (travaux de Kendrew).

- structure tridimensionnelle mise en évidence par cristallographie aux rayons X par Perutz suite aux travaux de Kendrew sur myoglobine de Cachalot (1957)
- 8 hélices alpha: A, B, C, D, E, F, G, H
- Séquence peptidique de Ntale vers Ctale
⇒ hélice A côté Ntale

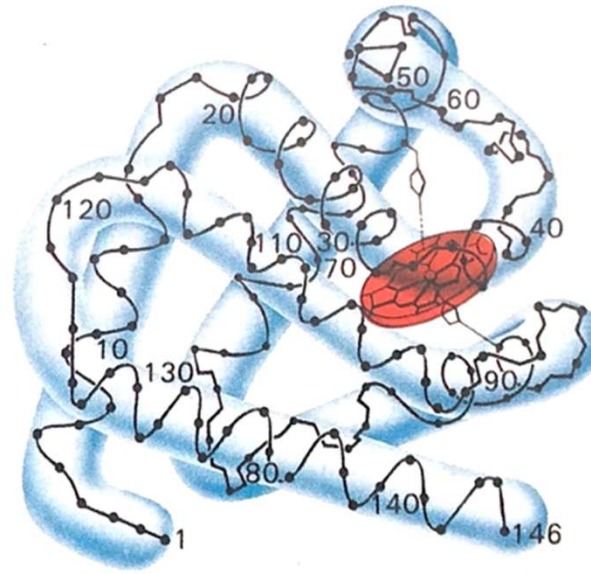


Cristallographie aux rayons X (première observation de protéines en 3D)



Myoglobine

Kendrew



Chaîne β de l'hémoglobine

Perutz



John Kendrew (1917-1997)



Max Ferdinand Perutz, (1914-2002)



1962: prix Nobel de chimie

Figure 7-17

Comparaison de la conformation de la chaîne principale de la myoglobine et de la chaîne β de l'hémoglobine. La similitude de leurs conformations est évidente. [D'après M.F. Perutz. The hemoglobin molecule. Copyright © 1964 par Scientific American, Inc. Tous droits réservés.]

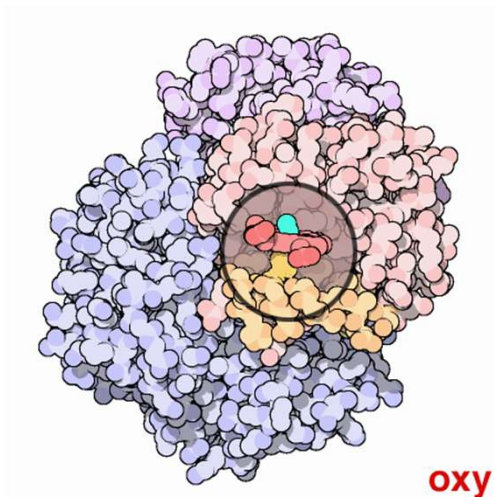
V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

4. Changements de conformation de l'hémoglobine et lien avec les échanges de gaz respiratoires

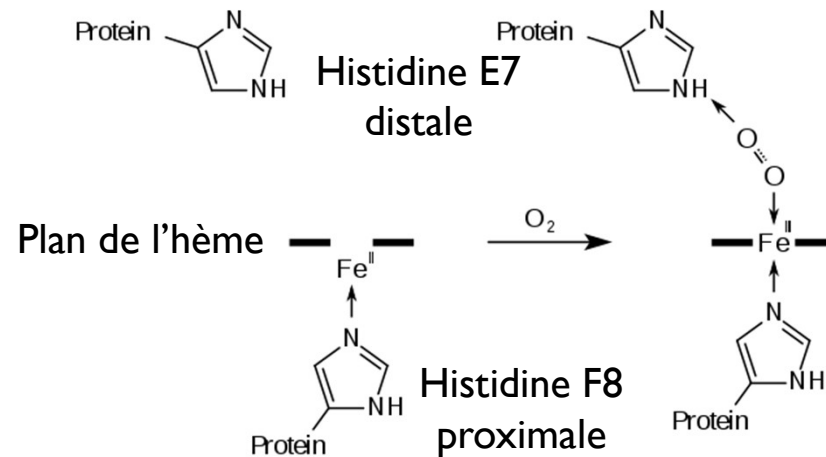


Environnement encombré de l'hème nécessaire pour **une oxygénation réversible**



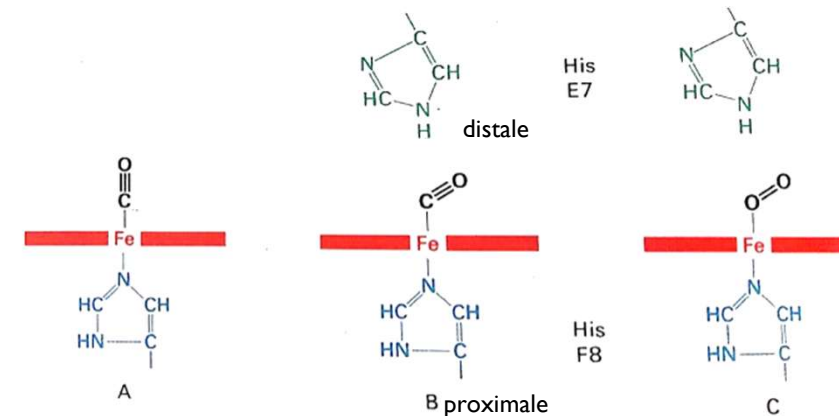
oxy

- Encombrement stérique dû à His E7 (distale)
 - ⇒ Empêche le monoxyde de carbone (CO) de se fixer
 - ⇒ Fixation réversible du O₂



HisE7 distale crée un encombrement stérique

Figure 7-13
Base structurale de la diminution de l'affinité de la myoglobine et de l'hémoglobine pour le monoxyde de carbone : (A) mode linéaire de liaison de CO aux porphyrines à fer isolées ; (B) mode angulaire de liaison de CO à la myoglobine et à l'hémoglobine, dans lesquelles l'histidine distale (E7) empêche CO de former une liaison linéaire et où l'affinité pour CO est ainsi considérablement réduite ; (C) mode angulaire de liaison de O₂ dans la myoglobine et l'hémoglobine. Les porphyrines à fer isolées fixent elles aussi O₂ selon un mode angulaire.



V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

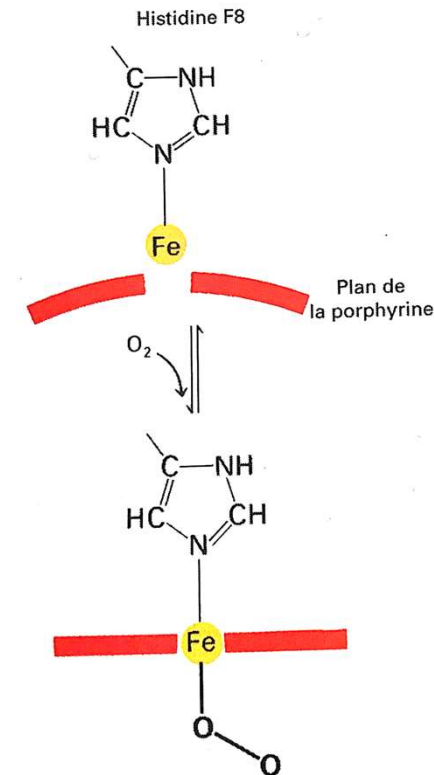
A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

4. Changements de conformation de l'hémoglobine et lien avec les échanges de gaz respiratoires



La fixation du dioxygène commute la structure quaternaire en déplaçant le fer en direction du plan de l'hème

1. Fixation de O_2 au fer fixé à His F8
2. Fer attiré dans le plan de l'hème
3. L'hème qui avait une forme de dôme (convexe) devient plan.
4. Déplacement de l'hélice F, coudes EF et FG
5. Transmission de ces changements conformationnels aux interfaces des sous-unités α - β
6. Rupture des liaisons électrostatiques
7. Passage de la conformation T (désoxyHb) vers R (OxyHb) transition allostérique



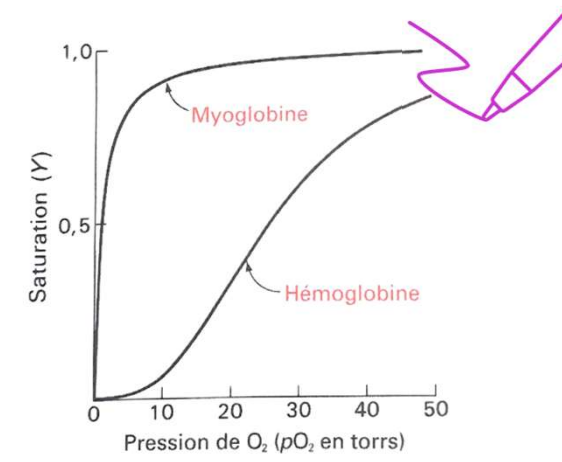
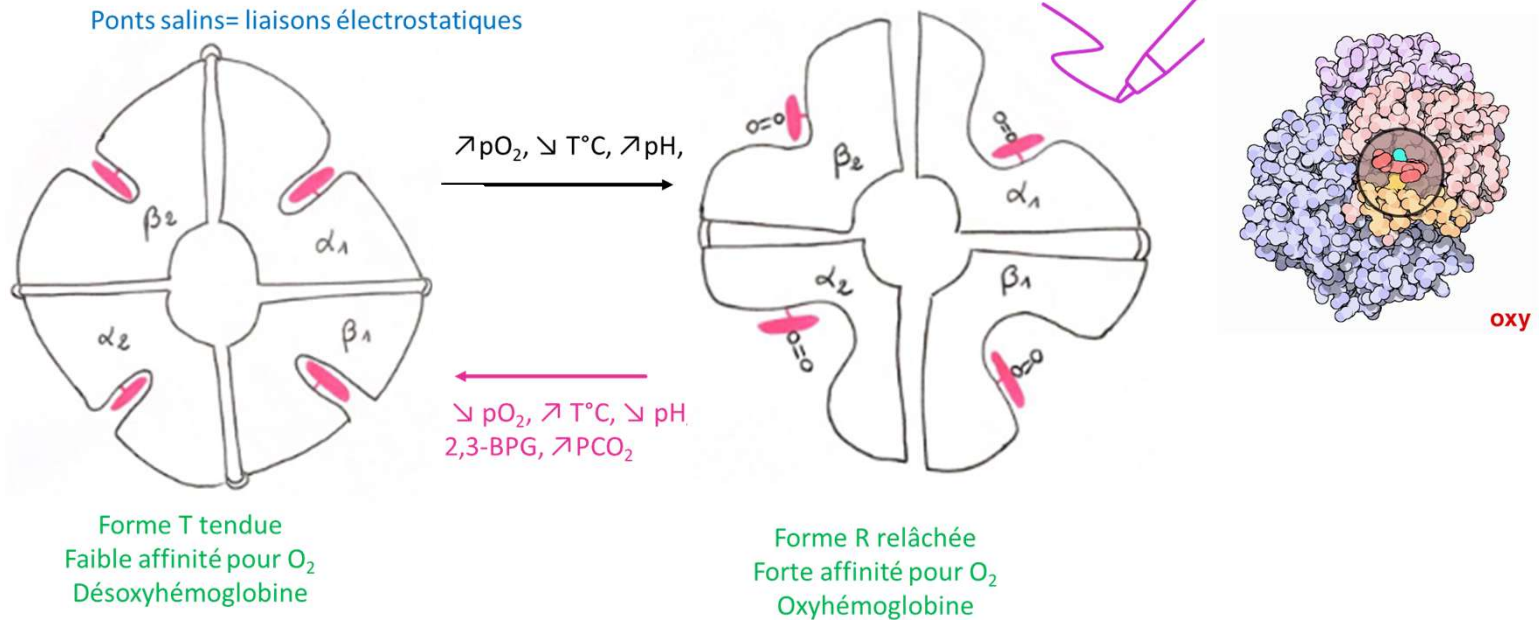


Figure 7-20
 Courbe de dissociation de l'oxygène de la myoglobine et de l'hémoglobine. La saturation des sites de fixation de l'oxygène est donnée en fonction de la pression partielle d'oxygène à laquelle est soumise la solution.

Figure 40: changement conformationnel d'une globine suite à la fixation d' O_2 (S. Dalaine)

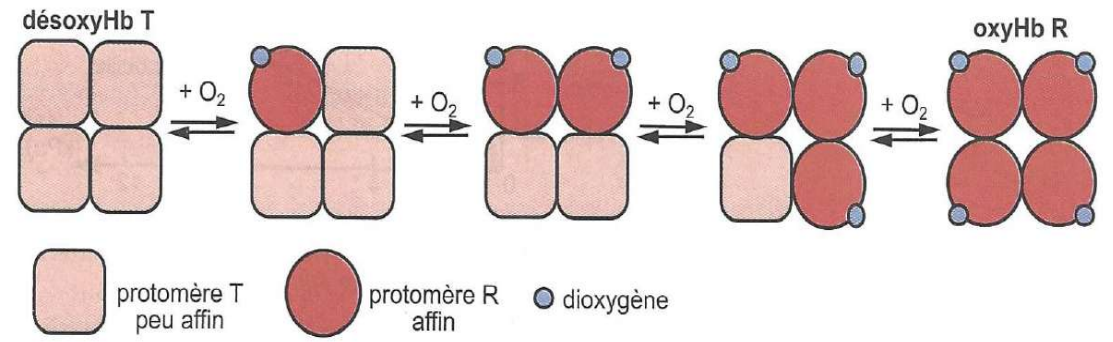
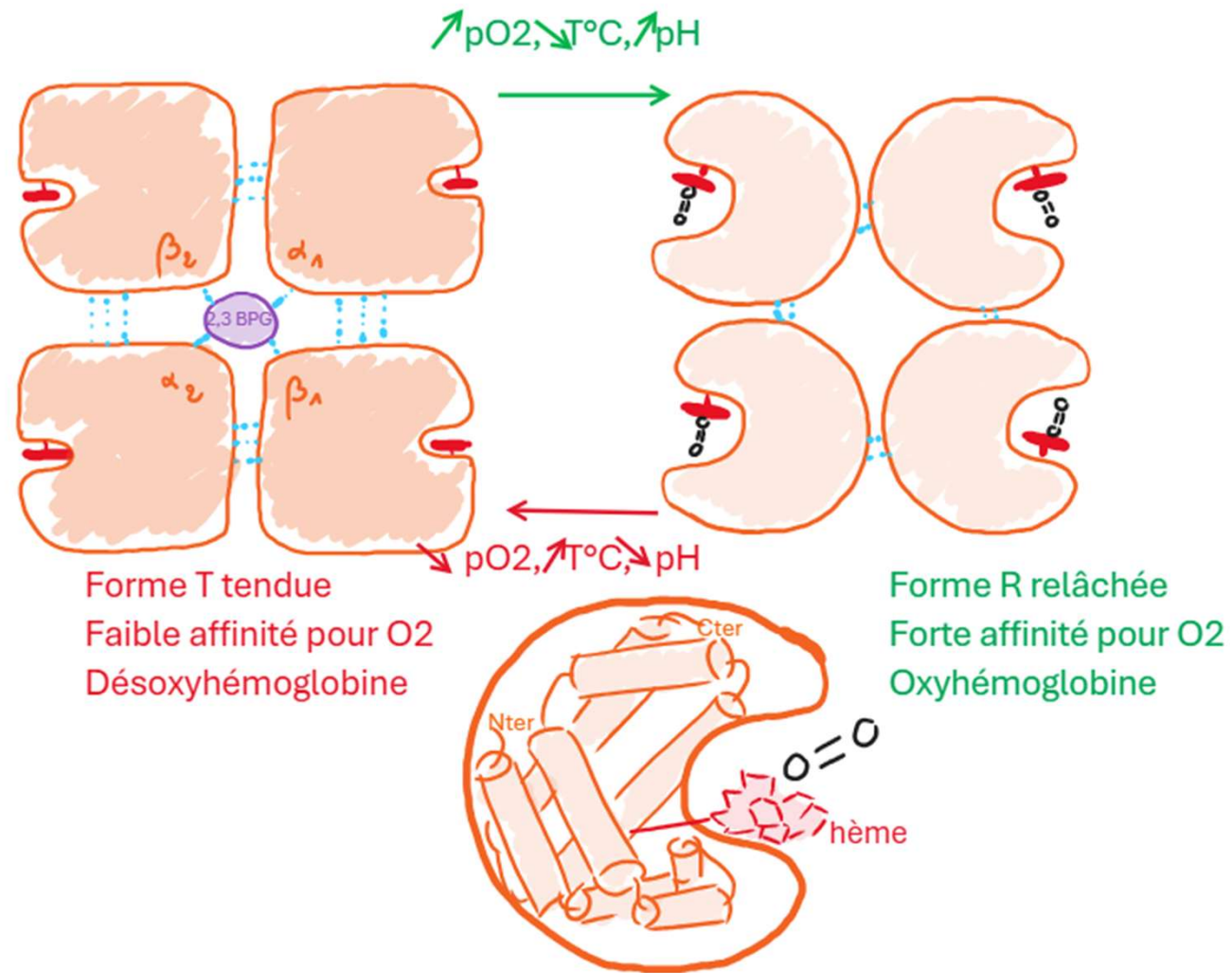


Figure 41 : Transition allostérique de l'hémoglobine et changement d'affinité pour le dioxygène (Richard, 1997)



- Saturation (Y): fraction des sites de liaison au dioxygène **occupés en solution**

- ⇒ $Y = 0$ tous les sites sont vides
- ⇒ $Y = 1$ tous les sites sont occupés

- Pour un pO_2 de 26 torr, la myoglobine est saturée à 1 (100%) alors que l'hémoglobine ne l'est qu'à 0,5 (50%)

- ⇒ La myoglobine présente une affinité plus grande pour O_2 que Hb
- ⇒ Dans les tissus musculaires, quelle que soit la pO_2 le dioxygène va toujours de Hb vers Mb

- **Allure hyperbolique** : Hyperbole: $Y = \frac{pO_2}{pO_2 + P_{50}}$ avec $MbO_2 \leftrightarrow Mb + O_2$

- **Allure sigmoïde**: $Hb(O_2)_n \leftrightarrow Hb + nO_2$

$$\Rightarrow Y = \frac{(pO_2)^n}{(pO_2)^n + (P_{50})^n}$$



- ⇒ Coopérativité au sein de Hb entre les sous-unités avec n coefficient de Hill
- ⇒ n augmente avec le degré de coopérativité (valeur max de $n = nb$ de sites de liaison)
- ⇒ $n = 2,8$ pour Hb

- Contextualisation aux pO_2 de l'organisme?

Torr
Unité de pression égale à la pression exercée par une colonne de mercure de 1 mm de haut à 0 °C et à la gravité standard (1 mmHg).
Ce nom a été donné en l'honneur d'Evangelista Torricelli (1608-1647) qui a inventé le baromètre à mercure.

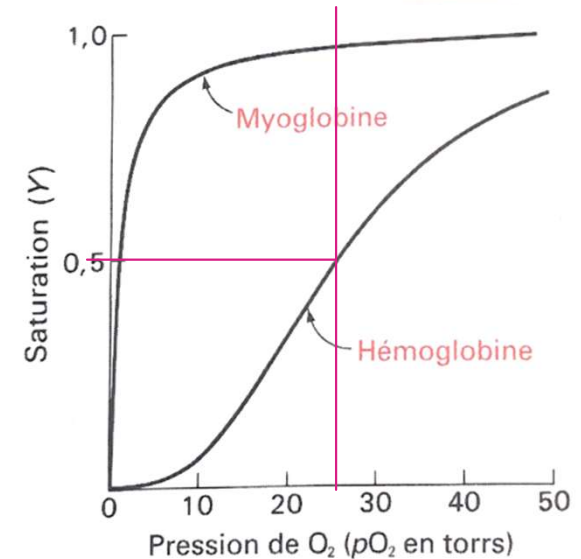


Figure 7-20

Courbe de dissociation de l'oxygène de la myoglobine et de l'hémoglobine. La saturation des sites de fixation de l'oxygène est donnée en fonction de la pression partielle d'oxygène à laquelle est soumise la solution.

- Pour une pO_2 de 100 torrs, saturation de Hb à 0,98; or **au niveau des alvéoles**, $pO_2 = 100$ torrs
 - ⇒ prise en charge quasi totale du dioxygène dans le sang artériel par Hb
 - ⇒ $HHb + 4O_2 \rightarrow HbO_8^- + H^+$
 - ⇒ **Passage de la forme T à la forme R**
- **Au niveau des capillaires des muscles en activité**, on mesure une pO_2 de 20 torrs, à cette pression Hb présente une saturation de 0,32
 - ⇒ l'affinité de Hb a diminué pour O_2 , qui est alors libéré dans les tissus consommateurs
 - ⇒ On obtient $HbO_8^- + H^+ \rightarrow HHb + 4O_2$
 - ⇒ **Passage de la forme R à la forme T**
 - ⇒ Hb réduite (HHb) peut alors prendre en charge le CO_2 produit par les muscles
- Bilan: pour $n = 2,8$ alors $\Delta Y = 0,98 - 0,32 = 0,66$
 - ⇒ 66% de dioxygène transmis par Hb des alvéoles aux muscles
- Si $n = 1$ alors pour une pression de 100 torrs (alvéole), $Y_{alvéole} = 0,79$
- Si $n = 1$ pour une pression de 20 torrs dans les muscles, alors $Y_{muscles} = 0,43$
 - ⇒ Bilan: pour $n = 1$ alors $\Delta Y = 0,79 - 0,43 = 0,36$
 - ⇒ 36% de dioxygène transmis par Hb des alvéoles aux muscles
- **CONCLUSION:** la **coopérativité** rend **plus efficace** l'approvisionnement en O_2 via Hb

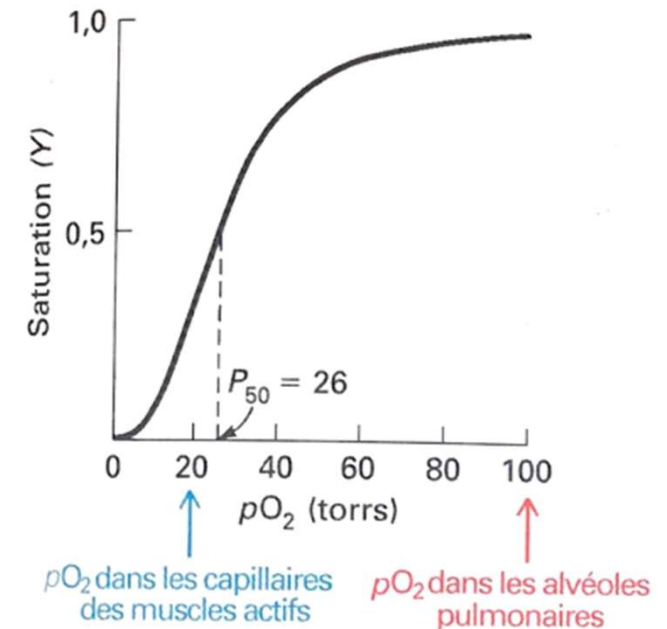
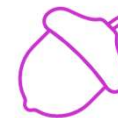


Figure 7-22

Courbe de dissociation de l'oxygène de l'hémoglobine. Les valeurs normales de la pO_2 dans les capillaires des muscles en activité et dans les alvéoles pulmonaires sont indiquées sur l'abscisse. Remarquez que la P_{50} de l'hémoglobine dans les conditions physiologiques se situe entre ces valeurs.

V. LES ÉCHANGES DE GAZ SANGUINS CHEZ LES MAMMIFÈRES

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

4. Changements de conformation de l'hémoglobine et lien avec les échanges de gaz respiratoires

Effecteur allostérique négatif: le 2,3-BPG

- Affinité de Hb pour O₂ plus faible dans hématie qu'en solution
- **2-3-bisphosphoglycérate (2,3-BPG):**
 - ✓ Intermédiaire métabolique de la glycolyse
 - ✓ molécule concentrée dans les hématies (~même concentration molaire que l'hémoglobine)
- 2,3-BPG ⇔ ∨ affinité de l'hémoglobine vis-à-vis du dioxygène (26 fois plus faible que si l'hémoglobine était libre) (chargé négativement, **se lie aux His de DésoxyHb**)
- Hb fœtale : faible affinité pour 2,3-BPG
 - ⇒ Affinité de Hb fœtale > affinité de Hb maternelle (une His en moins sur globine γ fœtale)
- En altitude: diminution de synthèse de 2,3-BPG

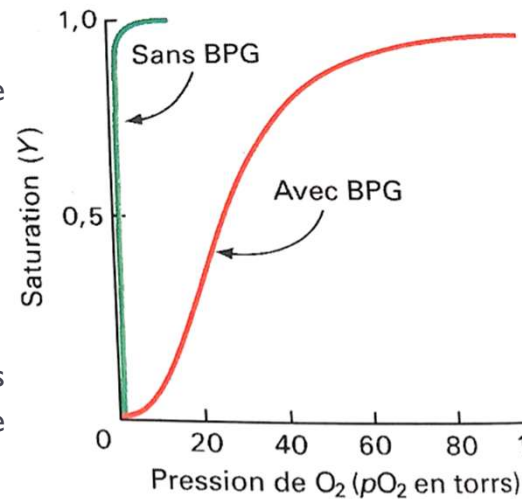
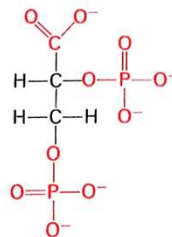


Figure 7-25

Le 2,3-bisphosphoglycérate (BPG) diminue l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène.



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

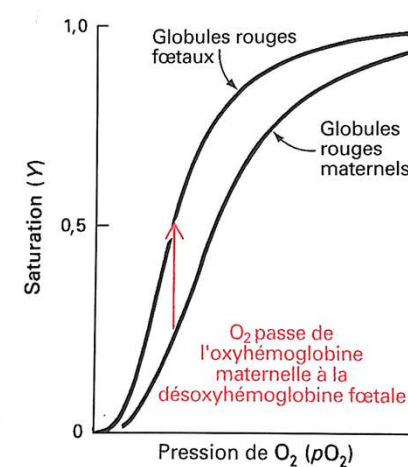


Figure 7-26

Les globules rouges sanguins fœtaux ont une plus grande affinité pour l'oxygène que les globules rouges sanguins maternels. La raison en est que, en présence de BPG, l'affinité de l'hémoglobine fœtale pour l'oxygène est supérieure à celle de l'hémoglobine maternelle.

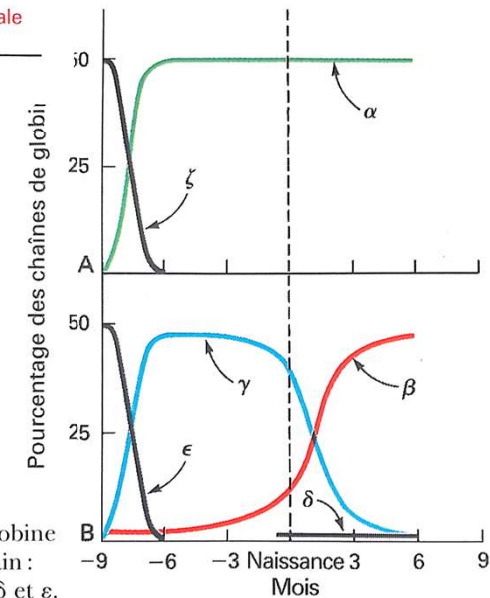


Figure 7-15

Expression des gènes de l'hémoglobine au cours du développement humain : (A) gènes α et ζ ; (B) gènes β, γ, δ et ε.

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

5. Bilan : allostéries de l'hémoglobine et transport des gaz



- **transition allostérique** de la molécule d'hémoglobine lors de la fixation de dioxygène → **courbe sigmoïde de saturation** de la protéine = (PO_2)
- Comparaison avec allure hyperbolique de saturation de myoglobine (protéine tertiaire non allostérique)
- Courbe de saturation ~ degré d'affinité pour l'hémoglobine sanguine du dioxygène, selon le tissu où l'on se trouve.
 - **Poumons:** pO_2 élevée (~ 13 kPa)
 - ✓ affinité de O_2 pour Hb très élevée (saturation proche de 100%)
 - ✓ O_2 rapidement fixé par Hb
 - **Tissus:** pO_2 faible (entre 2,5 et 5 kPa)
 - ✓ affinité de O_2 pour Hb diminue alors que celle de la myoglobine reste très élevée.
 - ✓ Libération de O_2 par Hb
 - ✓ HHb reconstituée et ainsi fixation de CO_2 par HHb

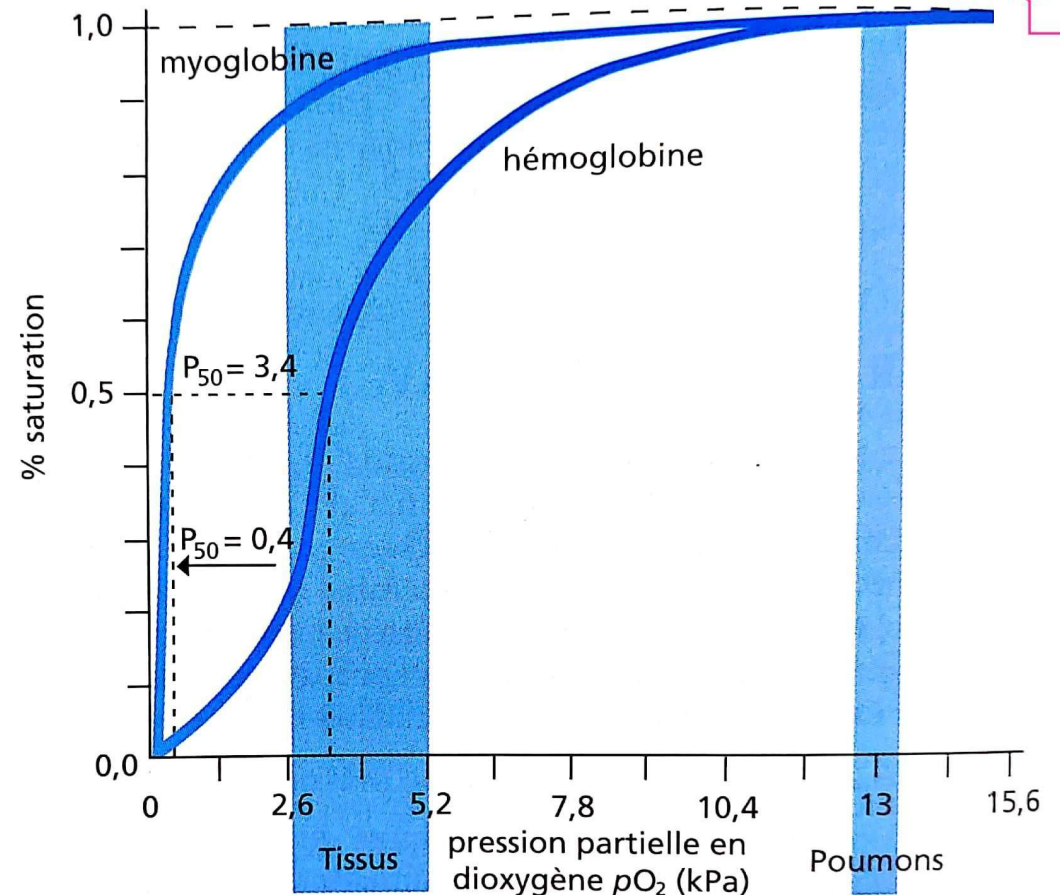


Figure 46 : Courbe de saturation en dioxygène de l'hémoglobine et de la myoglobine en fonction de la pression partielle en dioxygène

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

5. Bilan : allostéries de l'hémoglobine et transport des gaz

Effet Bohr: \searrow pH \Rightarrow décharge d'O₂ par Hb

- Activité musculaire

- \Rightarrow \nearrow du CO₂ et \nearrow d'acide lactique

- \Rightarrow \searrow du pH

- \triangleright CO₂ + H₂O \rightleftharpoons H₂CO₃ \rightleftharpoons HCO₃⁻ + H⁺

- \triangleright H₂CO₃ instable se dissocie rapidement en ion carbonate

- Or HHb + 4O₂ \rightleftharpoons HbO₈⁻ + H⁺

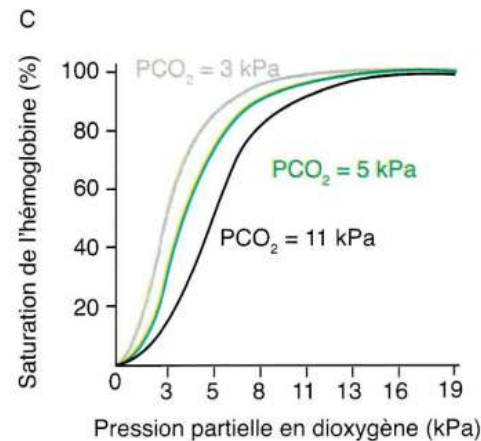
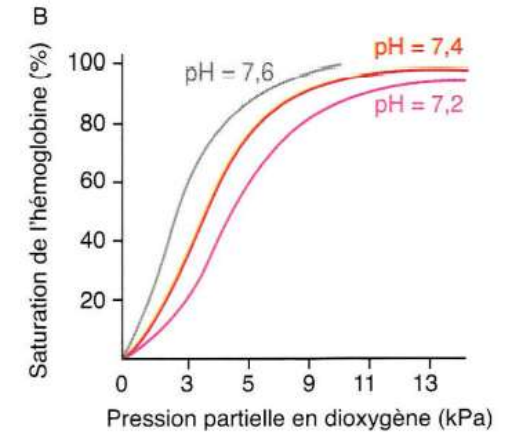
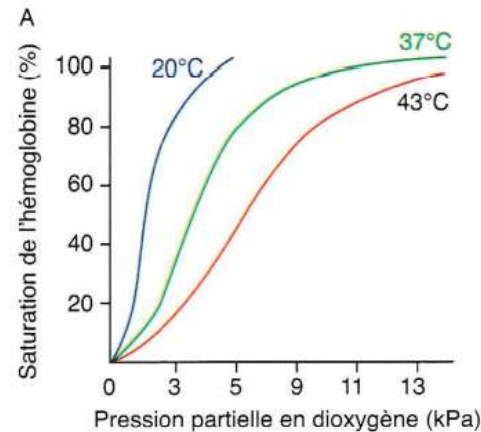
- \triangleright Donc si pH \searrow

- \Rightarrow \searrow de l'affinité de Hb pour O₂ avec passage sous forme HHb (T)

- \Rightarrow Décharge de O₂ par Hb dans les tissus musculaires et augmentation de affinité de HHb pour CO₂

- Affinité de CO₂ pour HHb

- \triangleright Fixation de CO₂ sur un groupe amine de Hb: carbhémoglobine (HbCO₂)



A. Effet de la température sur la saturation par le dioxygène de l'hémoglobine
 B. Effet du pH sur la saturation par le dioxygène de l'hémoglobine
 C. Effet de la pression partielle en dioxyde de carbone sur la saturation par le dioxygène de l'hémoglobine

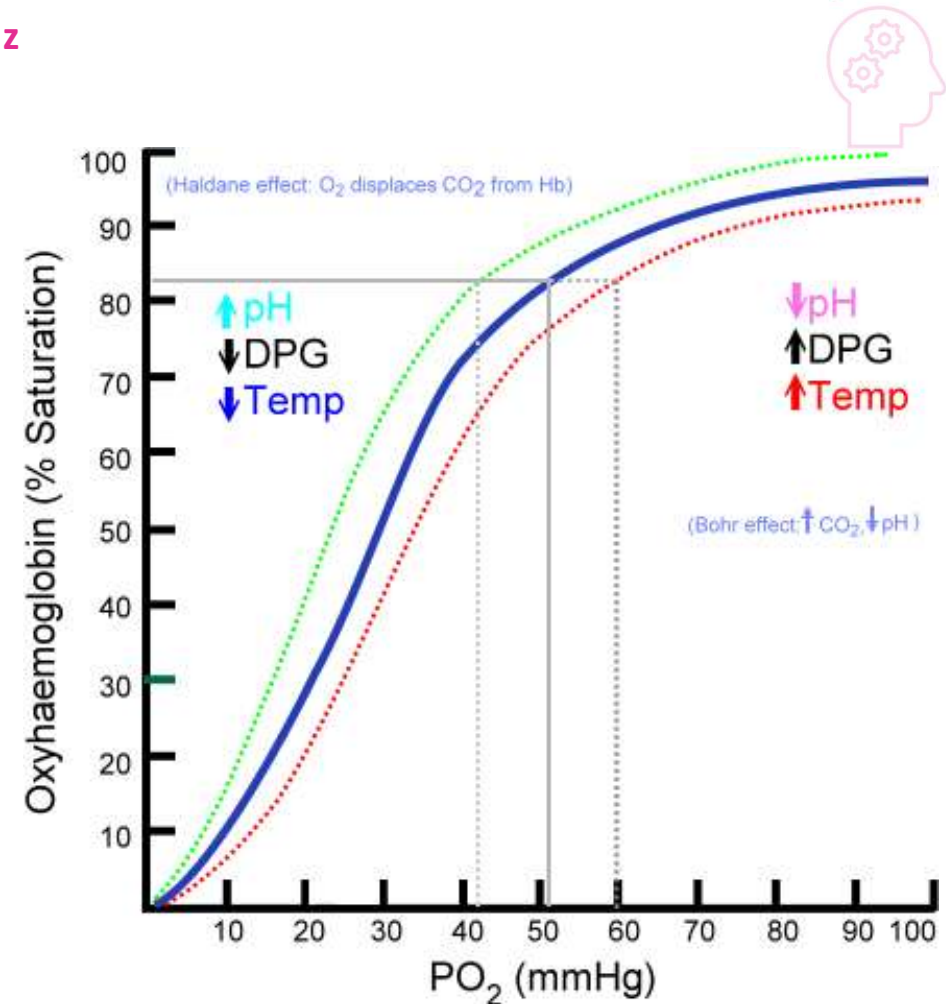
Figure 45 : des effecteurs allostériques favorisant la conformation tendue

A. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS PAR DES PIGMENTS RESPIRATOIRES

5. Bilan : allostéries de l'hémoglobine et transport des gaz

Effet Haldane: Hb oxydée est moins affine pour le CO₂

- Au niveau des alvéoles pulmonaires: P_{O₂} augmente dans le sang
- $\text{HHb} + 4\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HbO}_8^- + \text{H}^+$
 - 1
 - 2
- Sens ① favorisé
 - La forme relâchée (R) de l'Hb = forme oxydée à faible affinité pour CO₂
 - Relargage de CO₂ par Hb au niveau des poumons



PLAN

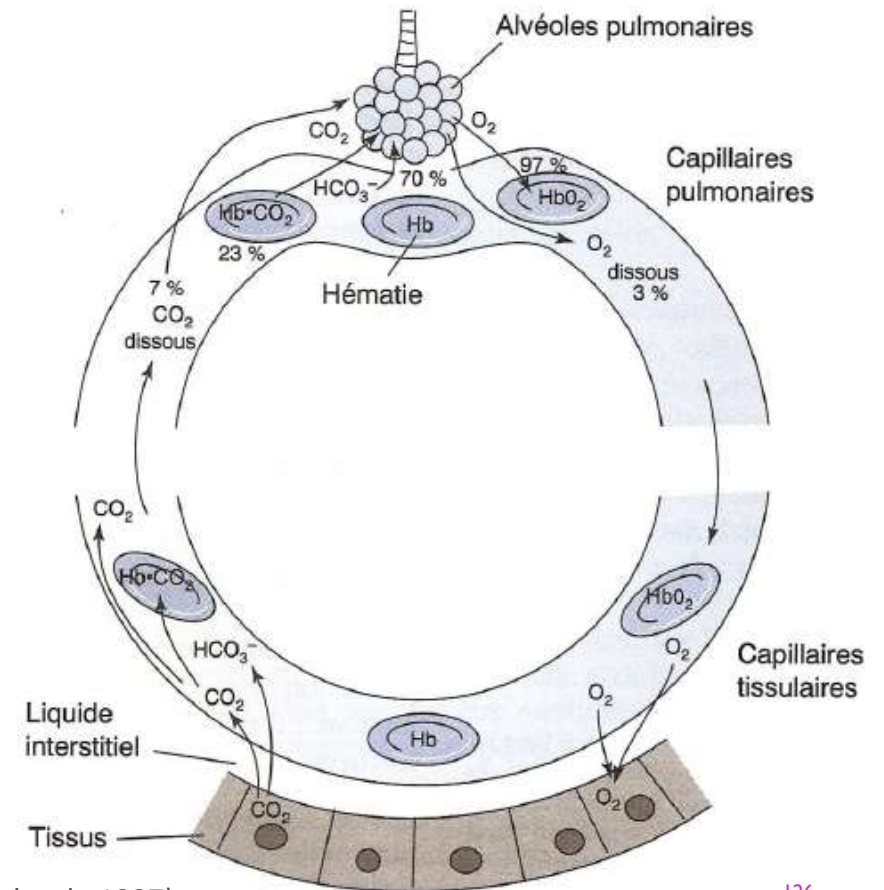
- I. Les échanges gazeux sont régis par des lois physico-chimiques
 - A. Transports de gaz et lois physico-chimiques
 - B. Contraintes du milieu de vie: comparaison du milieu aquatique et aérien
- II. Diversité des surfaces d'échanges respiratoires
 - A. Cas de surfaces non spécialisées
 - B. Structures respiratoires tégumentaires
 - C. Structures respiratoires en milieu aquatique: les branchies
 - D. Structures respiratoires invaginées en milieu aérien
- III. Mise en mouvement du milieu extérieur: ventilation
 - A. Ventilation pulmonaire chez les Mammifères
 - B. Ventilation branchiale chez les Téléostéens
 - C. Autres exemples de ventilation
- IV. Diversité des modes de « convection » interne
 - A. Echanges avec le liquide circulant
 - B. Diversité des compartiments et systèmes circulatoires
- V. **Les échanges de gaz sanguins chez les Mammifères**
 - A. **Transport des gaz sanguins par des pigments respiratoires**
 - B. **Forme de transport des gaz dans le sang des Mammifères**

B. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS DANS LE SANG DES MAMMIFÈRES

I. Formes de transport des gaz respiratoires

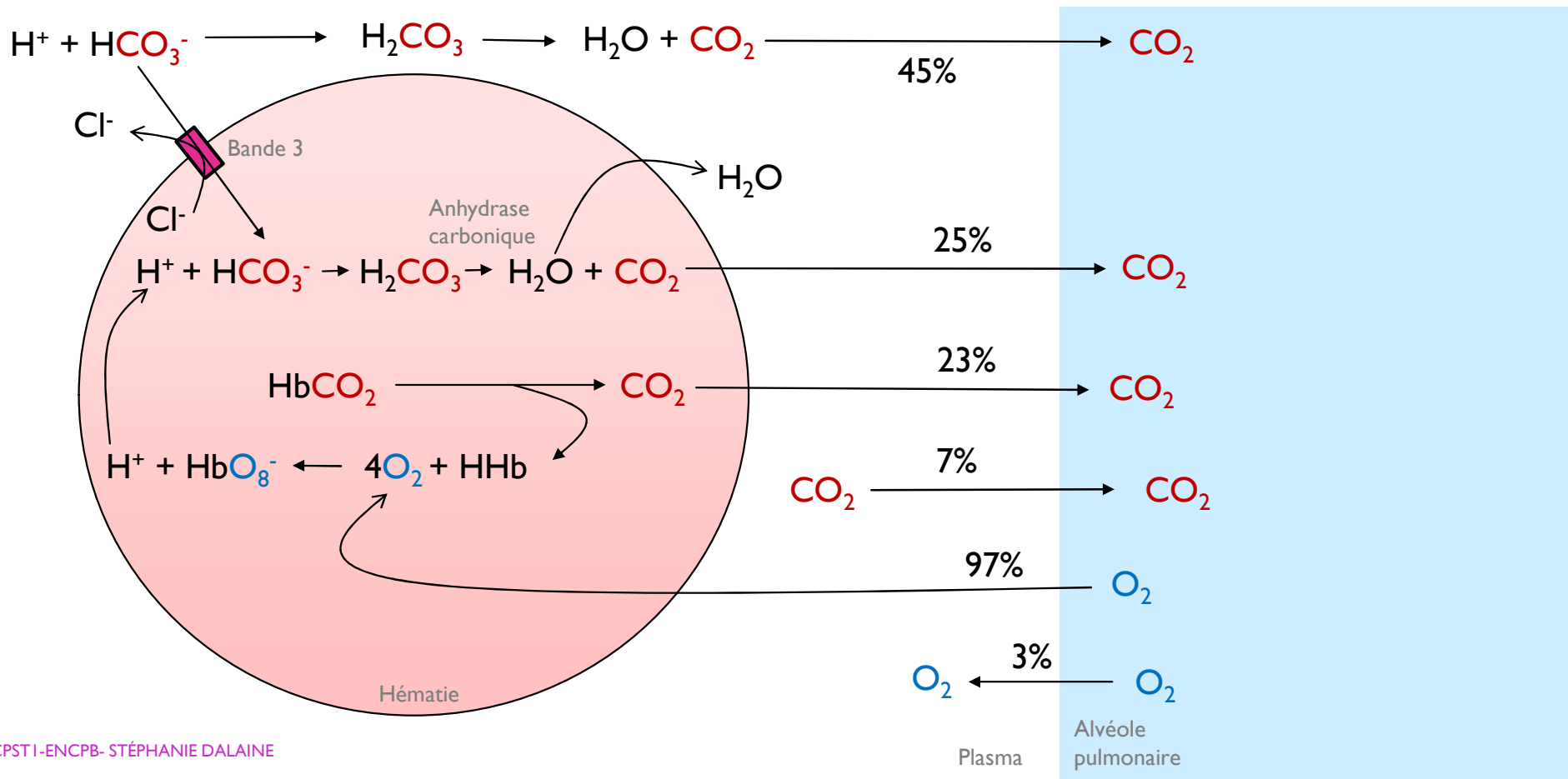
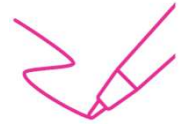


- Transport du dioxygène (très peu soluble dans l'eau):
 - **97% lié à l'Hb**
 - 3% sous forme dissoute
- Transport du dioxyde de carbone (peu soluble dans l'eau) :
 - 7% sous forme dissoute
 - 23% lié à l'Hb
 - **70% sous forme HCO_3^-**



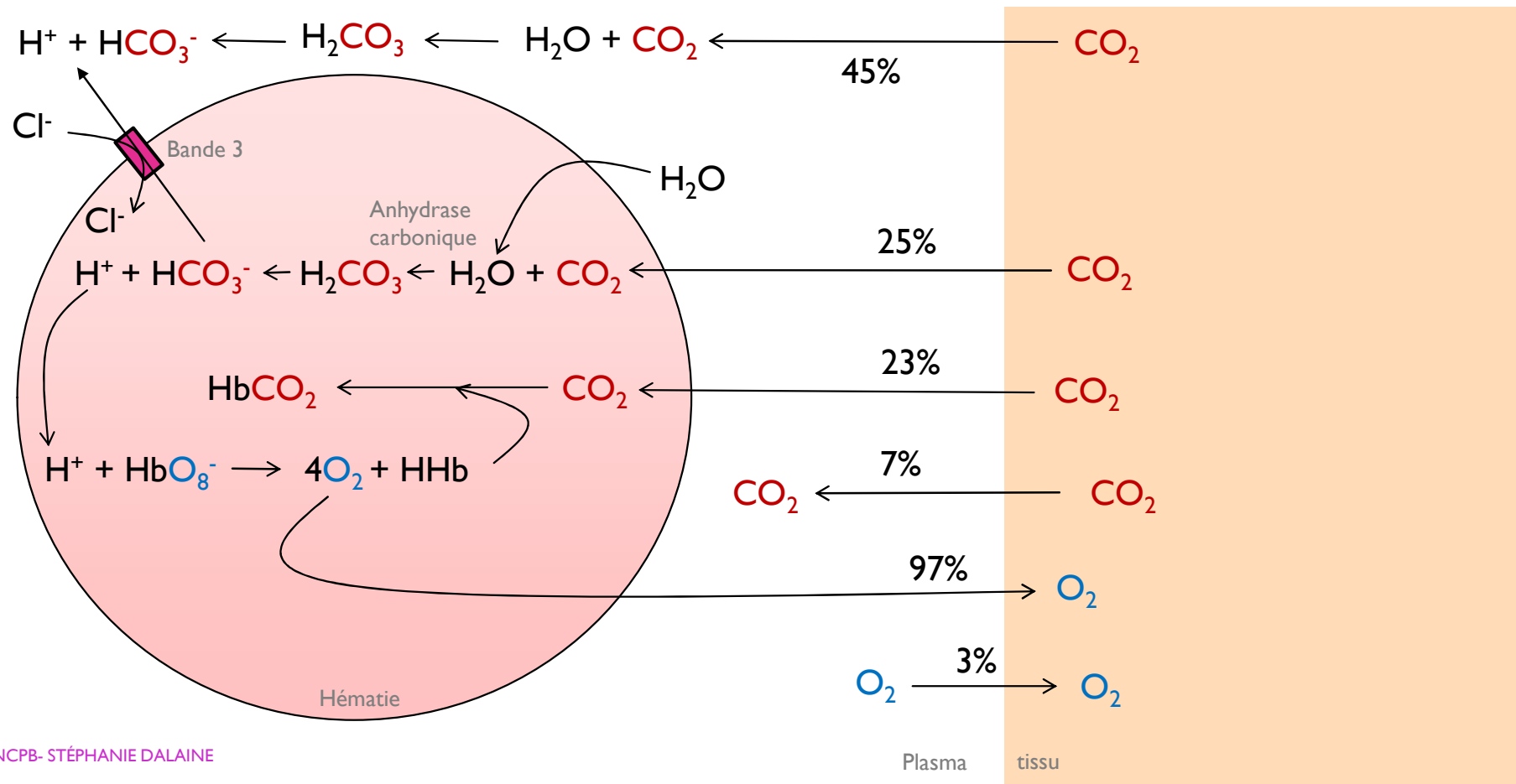
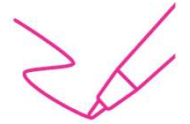
B. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS DANS LE SANG DES MAMMIFÈRES

2. Bilan: Echanges gazeux respiratoires au niveau pulmonaire



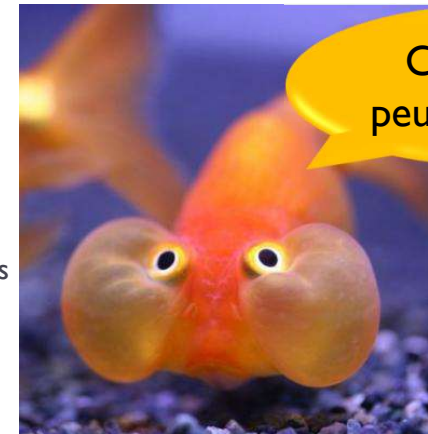
B. TRANSPORT DES GAZ SANGUINS DANS LE SANG DES MAMMIFÈRES

2. Bilan: Echanges gazeux respiratoires au niveau tissulaire



SUJETS D'ORAUX

- Comparaison branchies / poumons
- Respirer dans l'eau
- Respiration et milieux de vie chez les Vertébrés
- Respiration et milieu de vie
- Le renouvellement des fluides au contact des surfaces d'échanges respiratoires chez les métazoaires
- Les transports et échanges de gaz respiratoires chez les organismes animaux
- Sang et transport des gaz respiratoires
- L'approvisionnement des cellules en dioxygène chez les Animaux
- Du dioxygène atmosphérique à son entrée dans la cellule animale
- CO₂ et fonctionnement des organismes animaux
- L'hémoglobine, relation structure / fonction (2023)



Ca y est, je
peux respirer ?