

Figure 1 : de la respiration de l'organisme à la respiration cellulaire

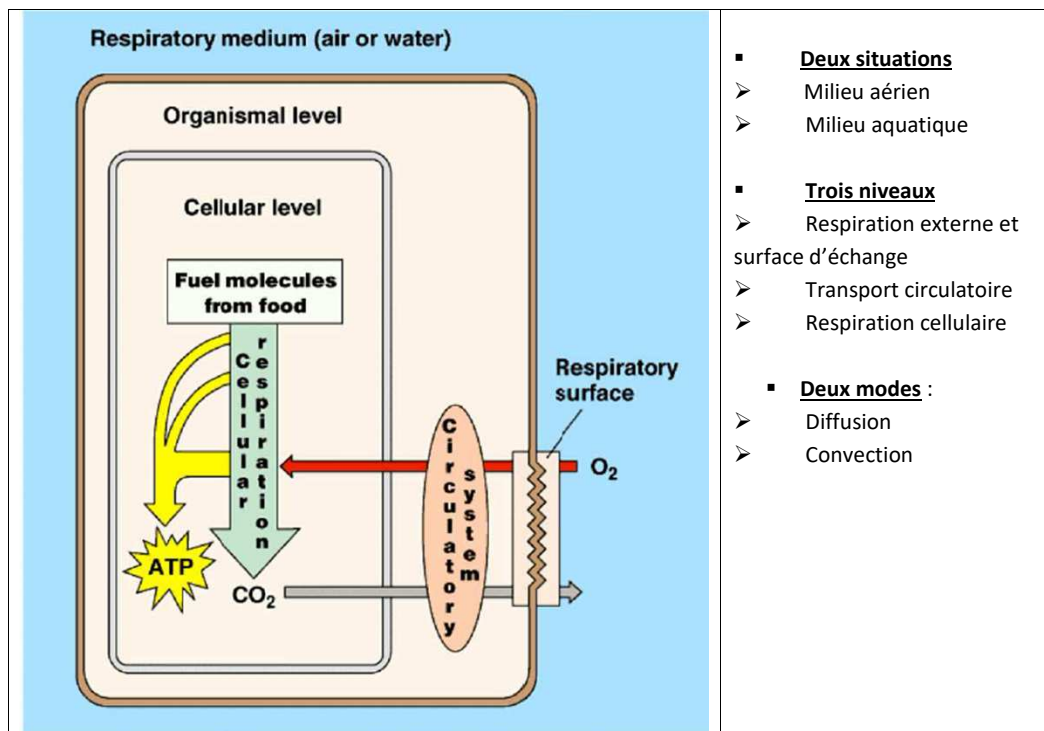


Figure 2 : Les gaz respiratoires dans l'air et dans l'eau

#### • Gaz atmosphériques

L'air est un mélange de gaz, pour lequel la pression est la somme des pressions partielles des différents gaz pris séparément.

Composition de l'air sec à une pression atmosphérique normale de 760mmH : **20,95% d'O<sub>2</sub>** et **0,041% de CO<sub>2</sub>**. Les autres gaz sont inertes ; **78% de N<sub>2</sub>**, 0,93% d'argon et 0,002% de gaz rares.

Dans les poumons de l'homme et des vertébrés à respiration aérienne, l'air est toujours saturé en vapeur d'eau pour la diffusion des gaz (évite la perte d'eau lors de la respiration)

#### • Solubilité des gaz respiratoires dans l'eau

Si un gaz et de l'eau sont mis en contact, des molécules de gaz entrent dans l'eau et s'y dissolvent. Elles se retrouvent en solution jusqu'à un état d'équilibre ou le nombre de molécules qui entre est égal au nombre de molécules qui sort : les gaz se dissolvent dans l'eau jusqu'à ce que les pressions partielles soient égales dans l'air et dans l'eau.

La quantité de gaz dissous dépend de :

##### - la nature du gaz :

- le **dioxygène** est **moins soluble dans l'eau** que dans l'air (30 fois moins) : donc le dioxygène est moins disponible dans l'eau -> c'est un facteur limitant
- le **CO<sub>2</sub>** est beaucoup plus soluble qu'O<sub>2</sub> (30 fois plus) dans l'eau et sera plus facilement évacué que O<sub>2</sub>.

##### - sa pression partielle

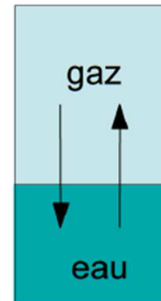
- sa **solubilité** qui dépend de sa **nature**, de la **température** et de la présence de **solutés** (sels) dans l'eau.

- les gaz sont **moins solubles** quand la **température augmente** : les eaux froides sont toujours mieux oxygénées que les eaux chaudes

- la présence de sels dissous diminue la solubilité de O<sub>2</sub> dans l'eau : A T°C égale, l'eau de mer est toujours plus pauvre en O<sub>2</sub> (-20%) que l'eau douce. Certains poissons (anguille, saumon) doivent s'adapter quand ils passent d'un milieu à l'autre.

On définit le **coefficient de solubilité d'un gaz** comme le volume d'un gaz dissous dans un litre d'eau quand la pression du gaz sans vapeur d'eau est de **1 atm**.

	Volume dans un litre d'air atmosphérique	Volume dissous dans un litre d'eau
Azote	780,9 ml	13,2 ml
Dioxygène	209,5 ml	7,2 ml
Dioxyde de carbone	0,3 ml	0,3 ml
Gaz rares	9,3 ml	

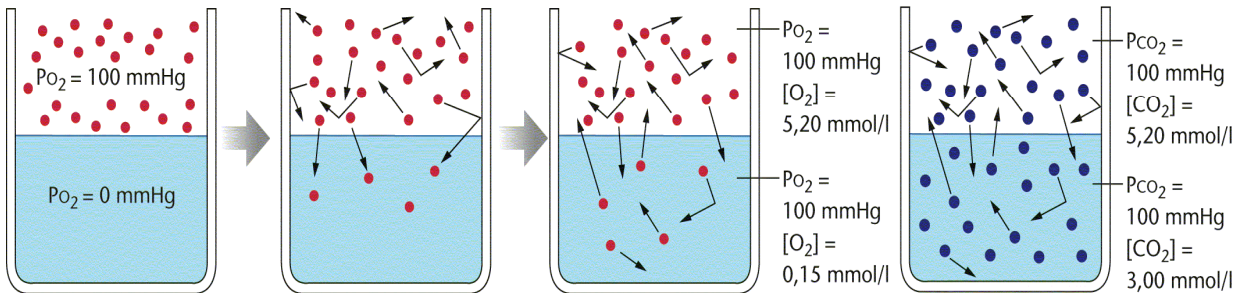


(a) État initial : pas d'oxygène dans la solution

(b) L'oxygène se dissout.

(c) À l'équilibre, les P<sub>O<sub>2</sub></sub> dans l'air et dans l'eau sont égales. La faible solubilité de l'O<sub>2</sub> fait que les concentrations ne sont pas égales.

(d) Quand le CO<sub>2</sub> est à l'équilibre à la même pression partielle, il y a davantage de CO<sub>2</sub> dissous.



© Pearson Education France

Figure 3 : comparaison des propriétés physiques des milieux aérien et aquatique

Caractère	Milieux aquatiques (eau douce, milieu marin)	Milieu aérien (= terrestre)
Densité	<b>forte</b> (d = 1) → poussée d'Archimède assurant le soutien de l'échangeur	<b>faible</b> → soutien de l'échangeur assuré par l'organisme
Viscosité	<b>forte</b> → frottements importants déplacement d'eau coûteux en énergie	<b>faible</b> → frottements réduits déplacements d'air peu coûteux en énergie
Teneur en O <sub>2</sub>	<b>Faible</b> ; faible solubilité de O <sub>2</sub> dans l'eau	<b>forte</b> (21 % O <sub>2</sub> dans l'air)
Diffusibilité des gaz	<b>faible</b> → diffusion lente des gaz dissous	<b>forte</b> → diffusion aisée des gaz

Desséchant	<b>NON</b>	<b>OUI</b>
------------	------------	------------

	Eau Milieu aqueux	Air Milieu desséchant	Rapport eau/air
Concentration en O <sub>2</sub> (mL.L <sup>-1</sup> )	7	209	1/30
Densité	1	0,0013	5400
Viscosité (mPa.s)	1	0,0200	50
Diffusibilité de l'O <sub>2</sub> (mol.s <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> .Pa <sup>-1</sup> )	3,4.10 <sup>-14</sup>	7,8.10 <sup>-9</sup>	1/235 000
Diffusibilité du CO <sub>2</sub> (mol.s <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> .Pa <sup>-1</sup> )	6,1.10 <sup>-9</sup>	7,10 <sup>-13</sup>	9 000

Bilan sur les contraintes en milieu aérien :

- La concentration de O<sub>2</sub> dans l'air y est 30 fois supérieur et les gaz y diffusent nettement plus rapidement.
- La viscosité de l'air est par ailleurs nettement inférieure à celle de l'eau. Il en découle qu'il est beaucoup moins coûteux de déplacer une quantité d'air qu'une même quantité d'eau. L'oxygène est donc largement plus disponible dans l'air que dans l'eau, et son accès y est nettement plus aisé ;
- un milieu desséchant et des risques de déshydratation ;
- l'accumulation du CO<sub>2</sub> au niveau sanguin ;
- un milieu peu porteur.

...et inversement en milieu aquatique.

#### Figure 4 : Rappel sur la loi de Fick

O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> sont de petites molécules lipophiles. Leur passage au travers de diverses interfaces (paroi capillaire, épithélium respiratoire) est exclusivement réalisé par **diffusion simple**. L'ensemble des échanges gazeux réalisés au niveau des surfaces d'échanges respiratoires suivent la **loi de Fick**. Le flux diffusif J<sub>x</sub> est donné par la **loi de Fick** :

$$J_x = -K_x \cdot (S/e) \Delta P_x$$

où K<sub>x</sub> est une constante de diffusibilité, S la surface et e l'épaisseur de l'interface, ΔP<sub>x</sub> la différence de pression partielle du gaz x de part et d'autre de l'échangeur. Le caractère passif de ce transport représente une économie d'énergie importante pour l'organisme. Les surfaces respiratoires spécialisées des animaux présentent des convergences liées à la loi de Fick.

- Une **grande surface** de contact avec l'environnement (S sur les figures) : ce paramètre est augmenté par l'existence de nombreux **replis** internalisés (alvéoles pulmonaires ; S = 100 m<sup>2</sup> chez l'homme) ou externalisés (lamelles branchiales des téléostéens ; S = 1 à 10 cm<sup>2</sup>/g d'animal).
- Une barrière de **faible épaisseur** (e sur les figures) sépare le fluide externe (eau ou air) du milieu intérieur : quelques microns pour l'épithélium branchial des téléostéens ; quelques dixièmes de microns pour l'épithélium alvéolaire des mammifères.

Figure 5 : diversité des échangeurs

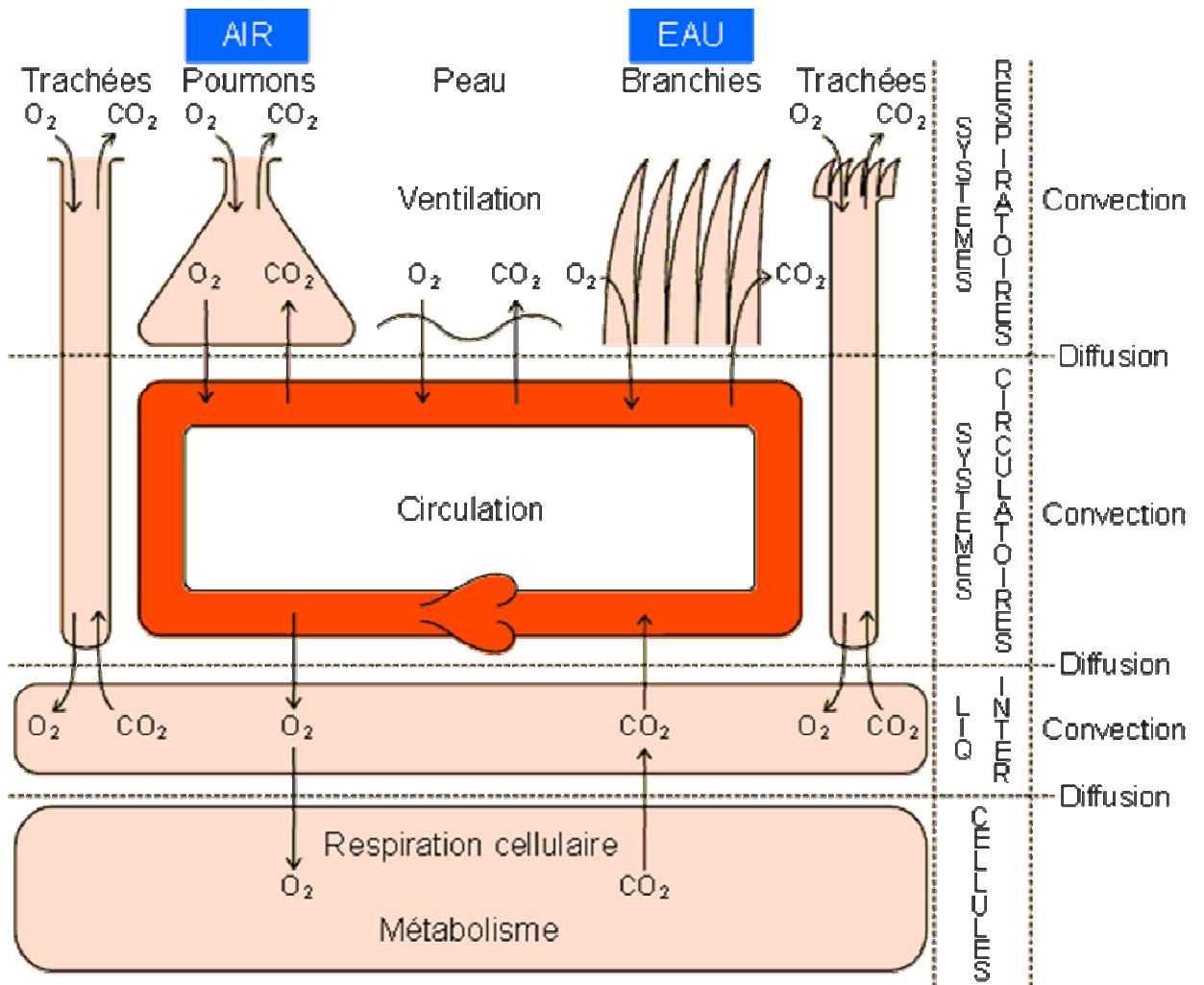
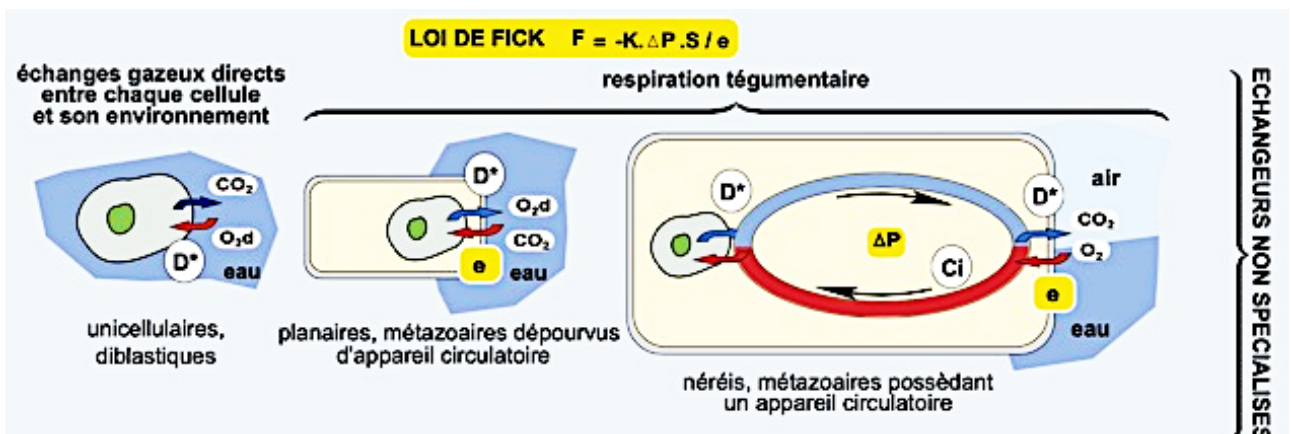


Figure 6 : échangeurs non spécialisés  
(in Dunod 2021)



**Figure 7 : rôle des parapodes dans la respiration de la néréis**  
 (<http://adamoliverbrown.com/> ; <https://www.zoologie-uclouvain.be/>)

La néréis est un annélide polychète errant métamérisé. Elle mesure environ 10 cm et vit dans la zone littorale.

Chaque métamère porte latéralement une paire d'expansions de la paroi du corps appelées **parapodes** à rôle locomoteur et respiratoire. La respiration ne met pas en jeu d'échangeur respiratoire spécialisé : c'est une **respiration tégumentaire**.

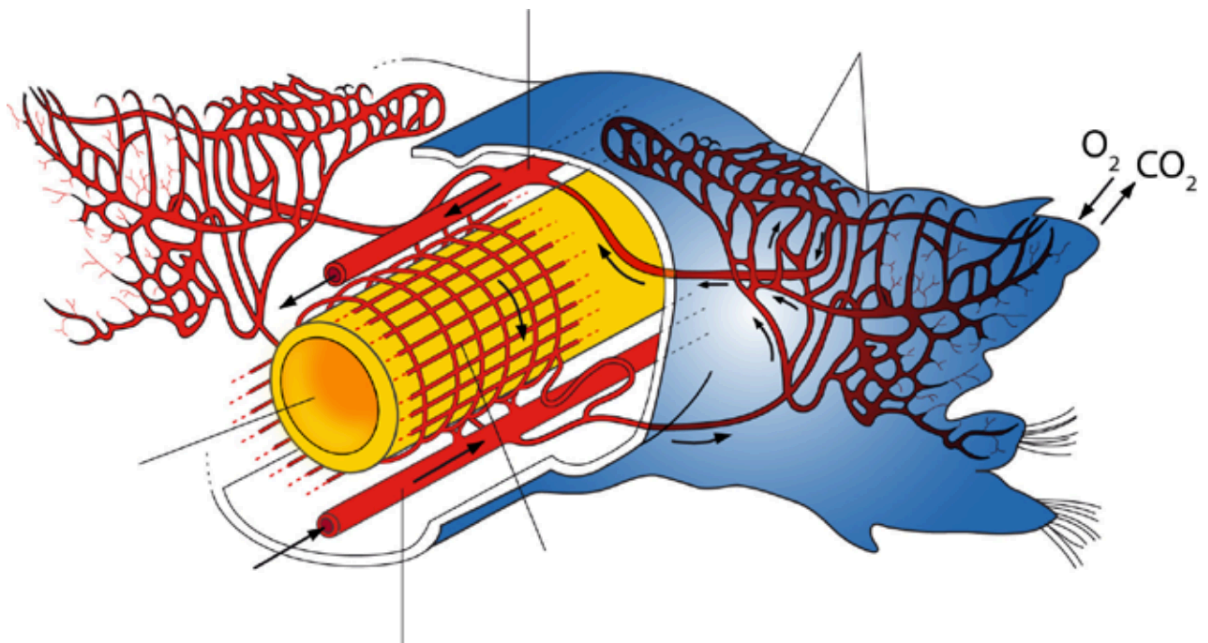
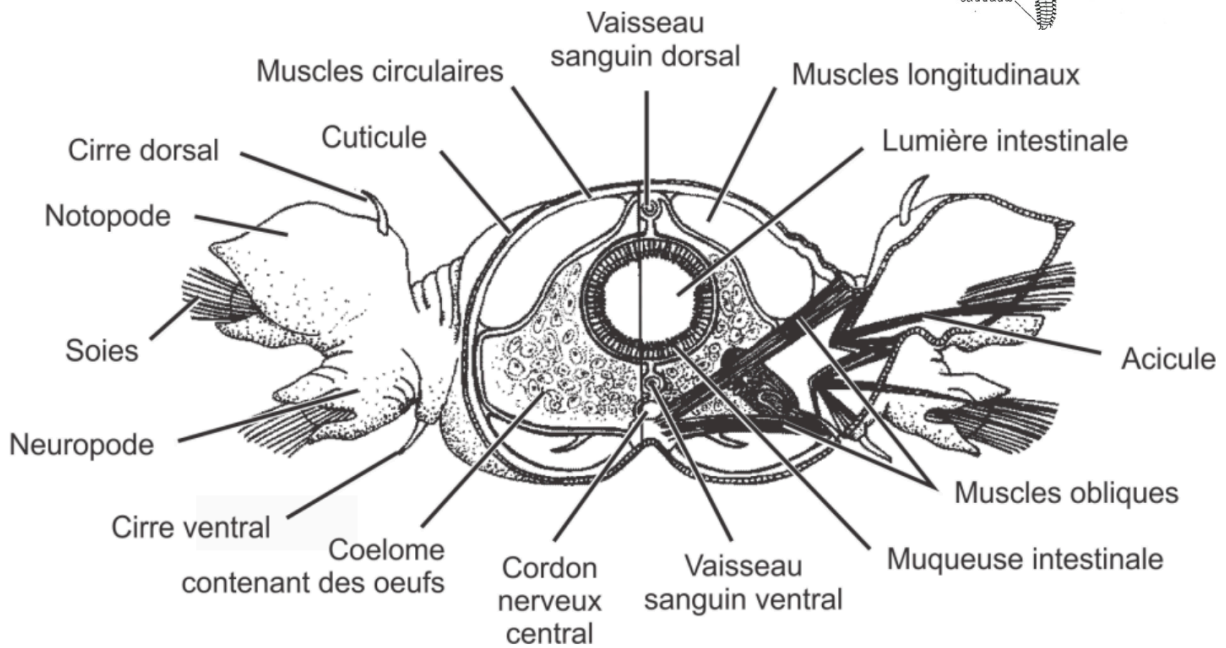
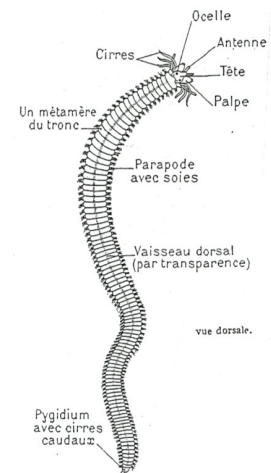
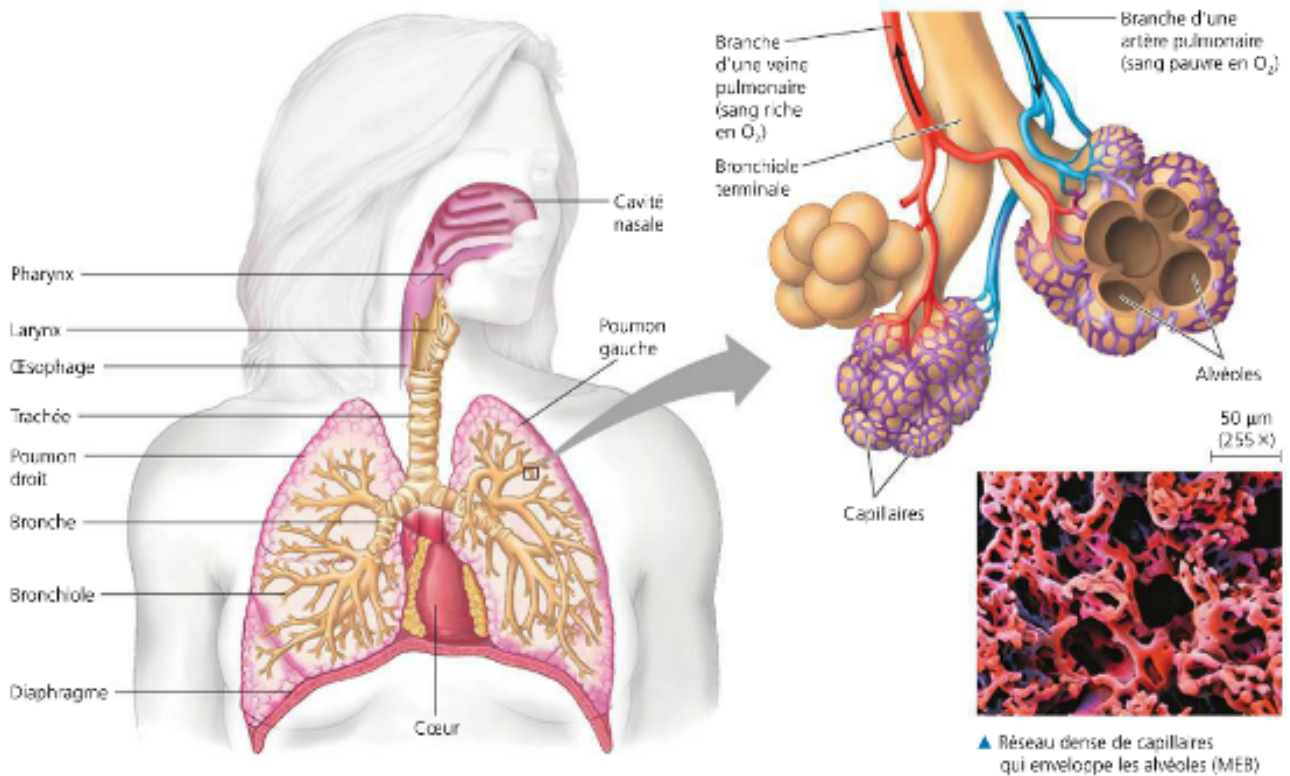
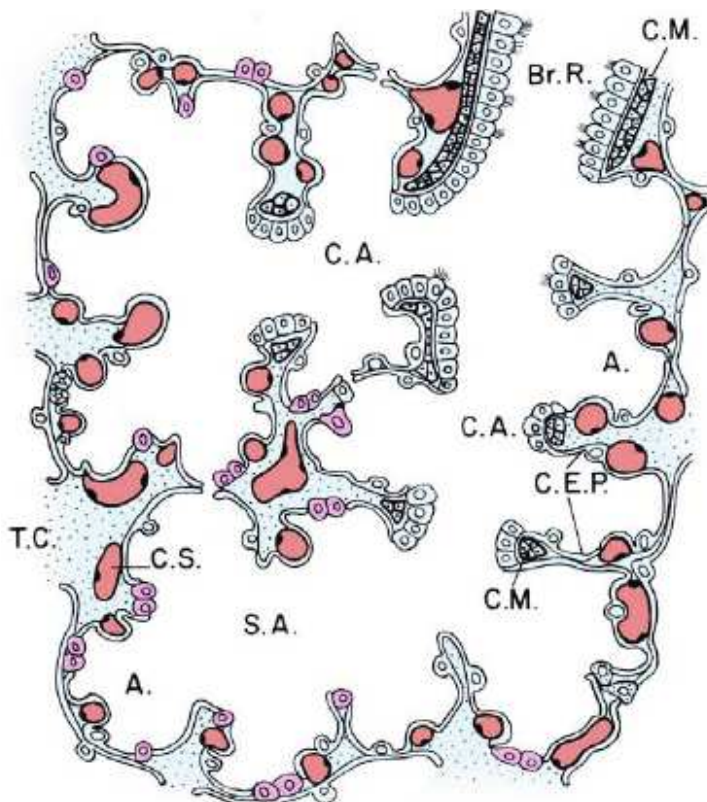


Figure 8 : appareil respiratoire des mammifères



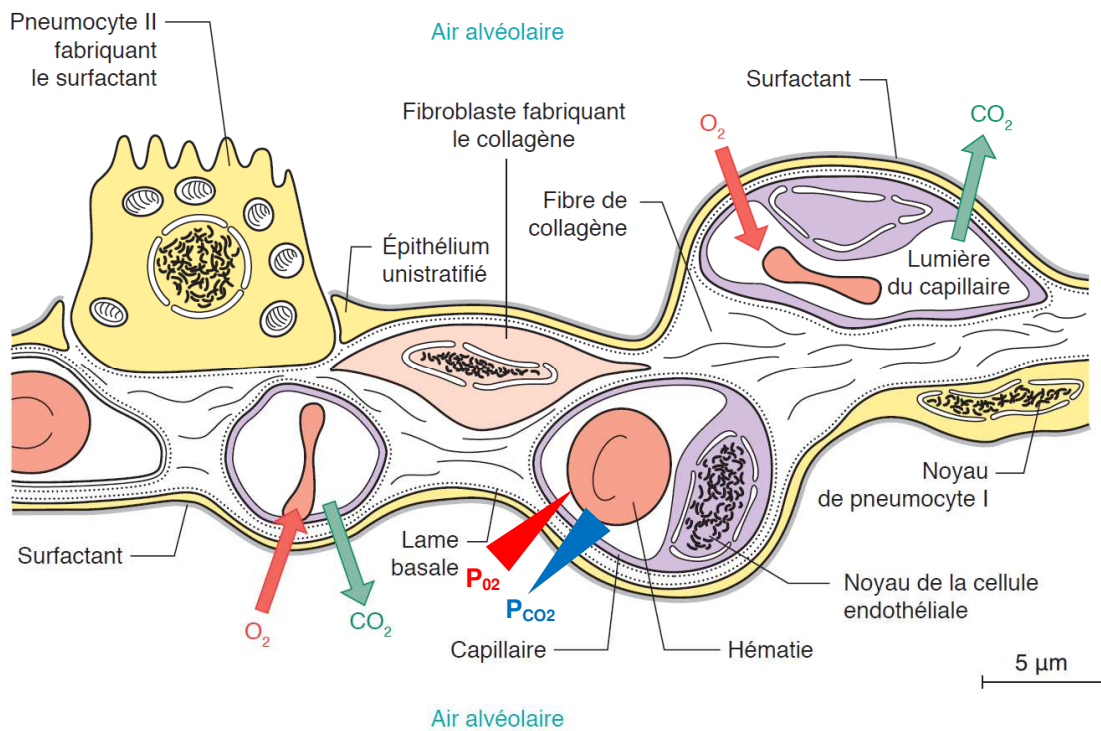
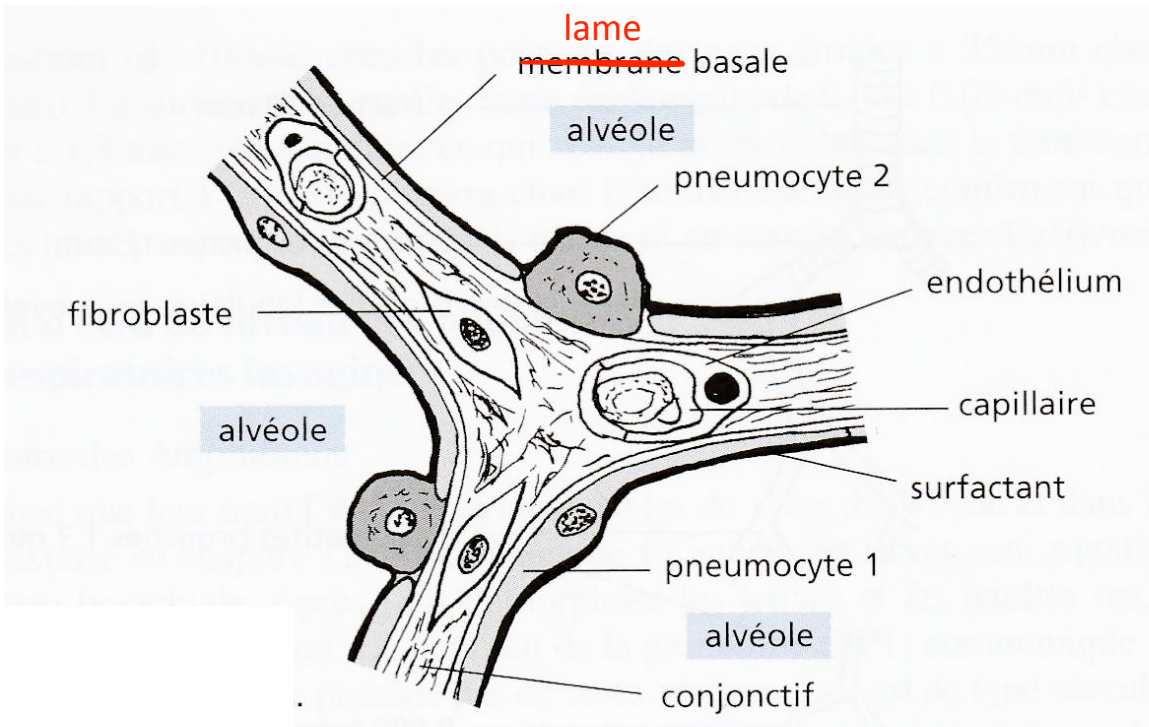
**Le système respiratoire des Mammifères.** L'air inhalé va de la cavité nasale au pharynx; il traverse le larynx, la trachée et les bronches, avant de se disperser dans les plus petites bronchioles. Celles-ci se terminent par des sacs alvéolaires microscopiques, les alvéoles. Un épithélium mince et humide recouvre les cavités alvéolaires. Les ramifications des artères pulmonaires apportent du sang pauvre en oxygène aux alvéoles, tandis que les embranchements des veines pulmonaires transportent du sang riche en oxygène des alvéoles au cœur.

**Ultrastructure de l'épithélium pulmonaire**

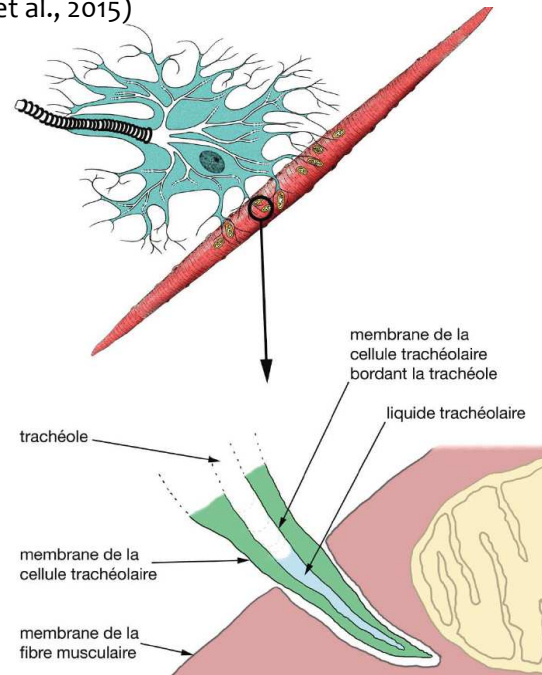
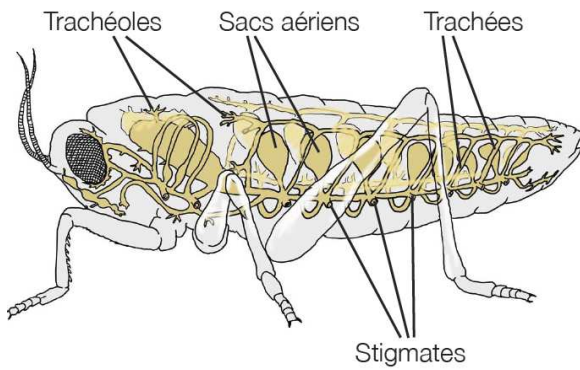


Al : alvéole  
 CA : canal alvéolaire  
 SA : sac alvéolaire  
 TC : tissu conjonctif  
 CS : capillaire sanguin  
 En violet : pneumocytes II (surfactant)

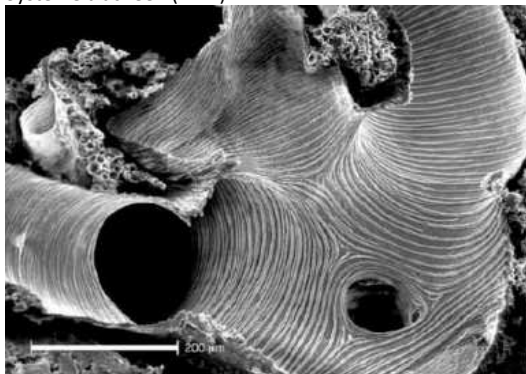
### Organisation fonctionnelle de la paroi alvéolaire. (Segarra et al., 2015)



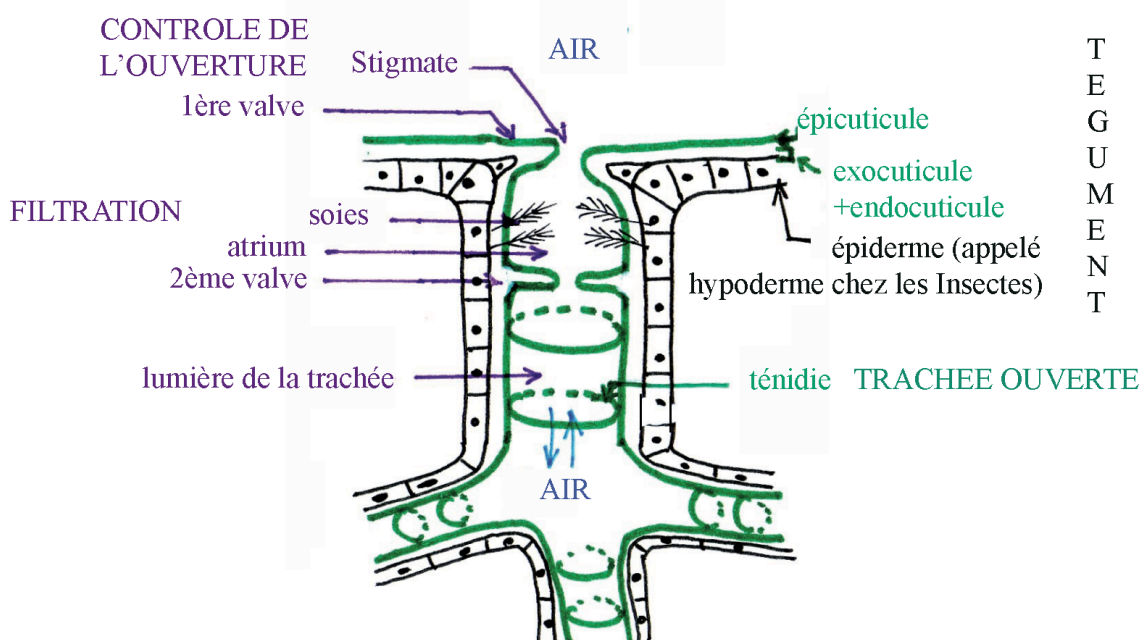
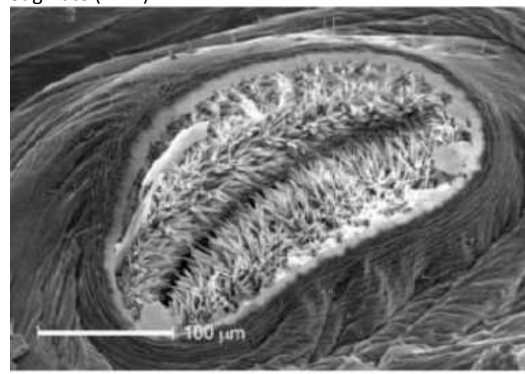
**Figure 9 : appareil respiratoire des Insectes**  
(B. Anselme ; Segarra et al., 2015)



Système trachéen (MEB)

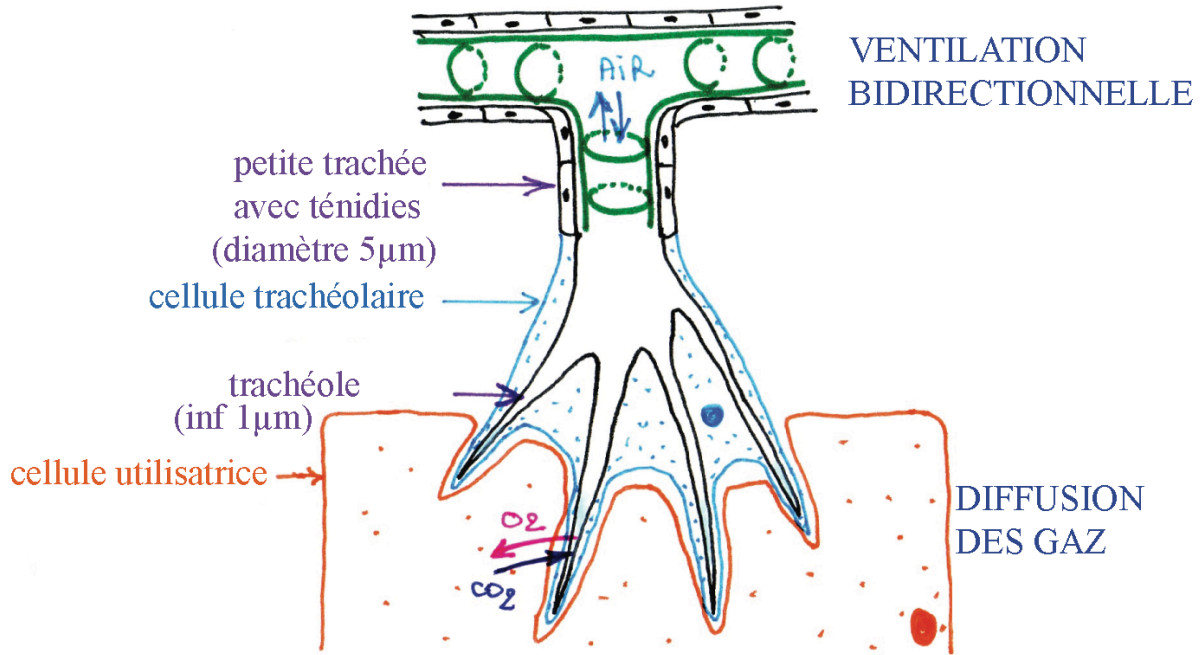


Stigmate (MEB)



T  
E  
G  
U  
M  
E  
N  
T





**Adaptation des échanges aux besoins cellulaires**

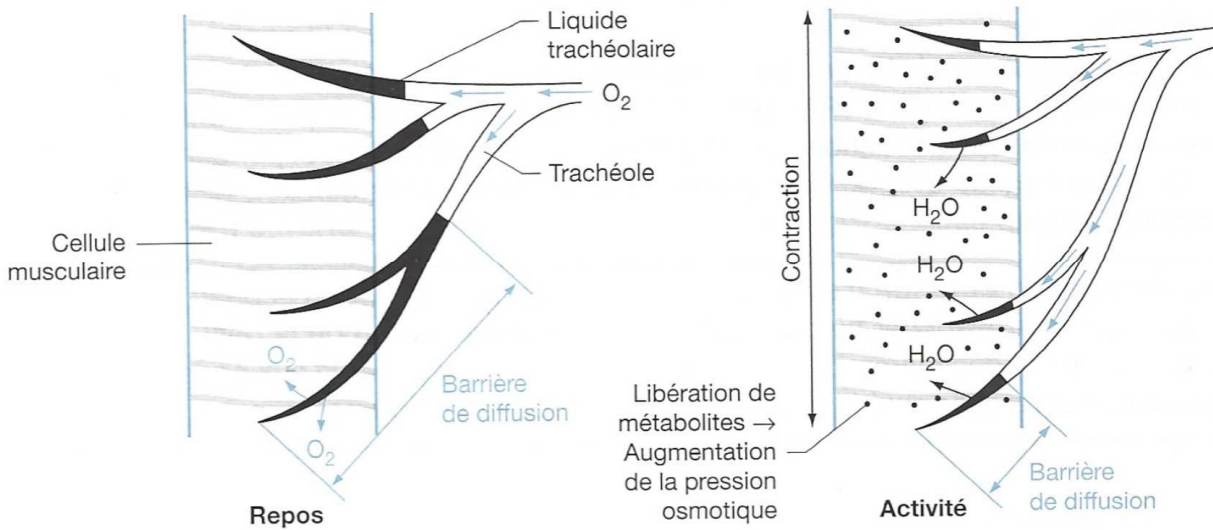
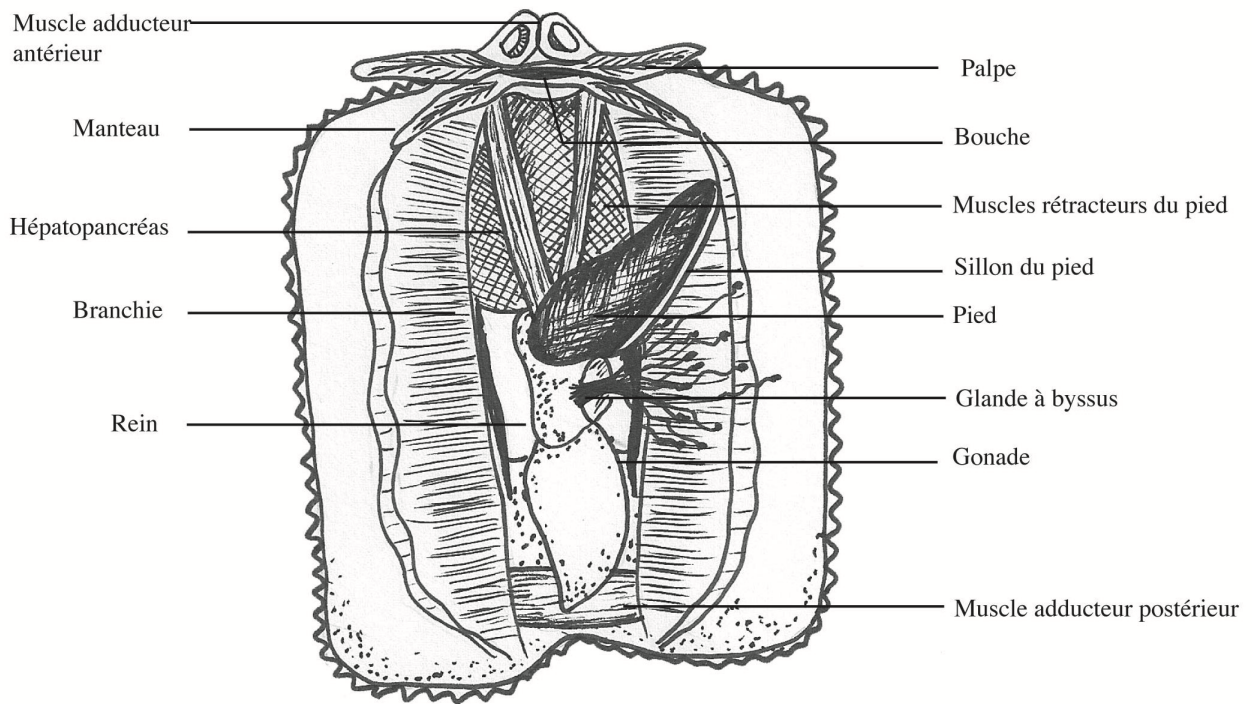
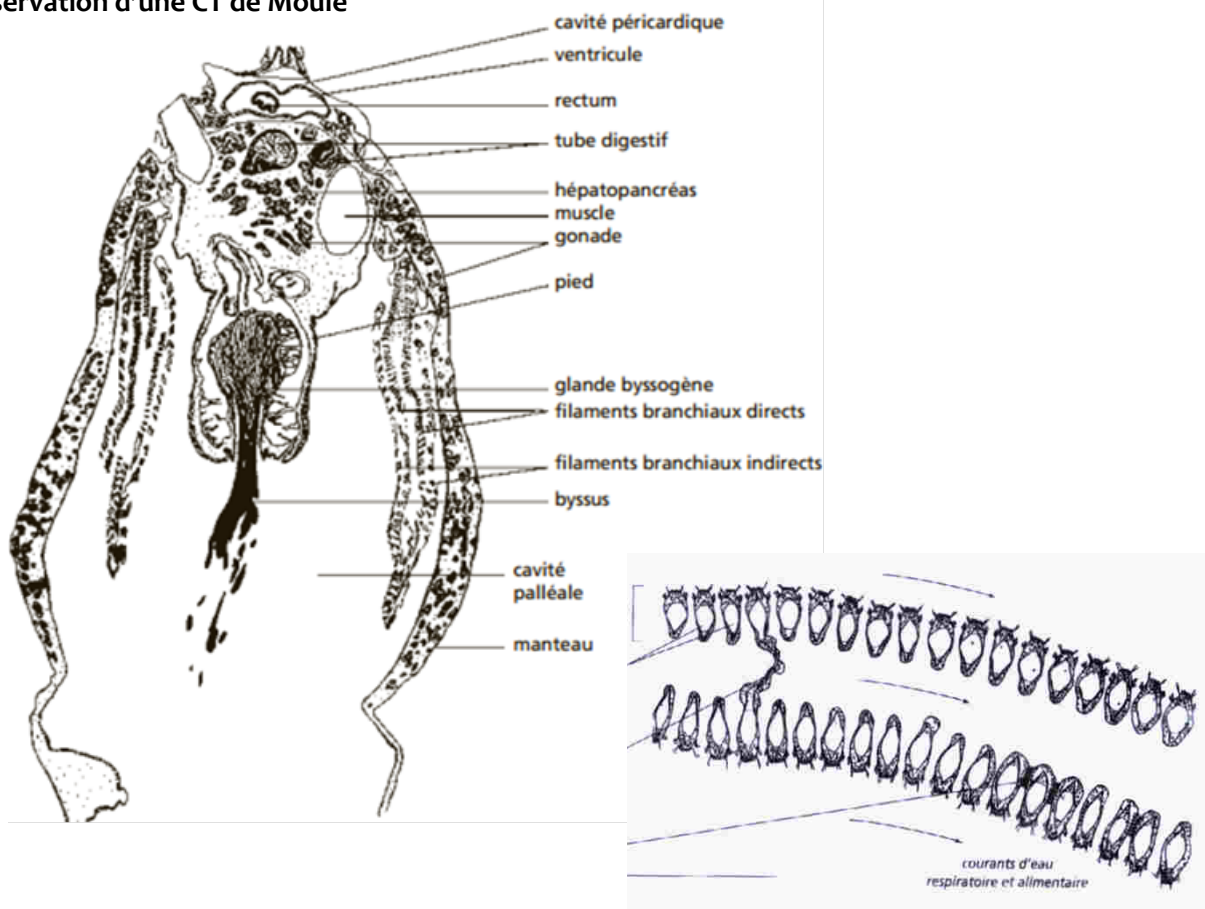


Figure 10 : appareil respiratoire de la moule (*Mytilus edulis*)



Observation d'une CT de Moule



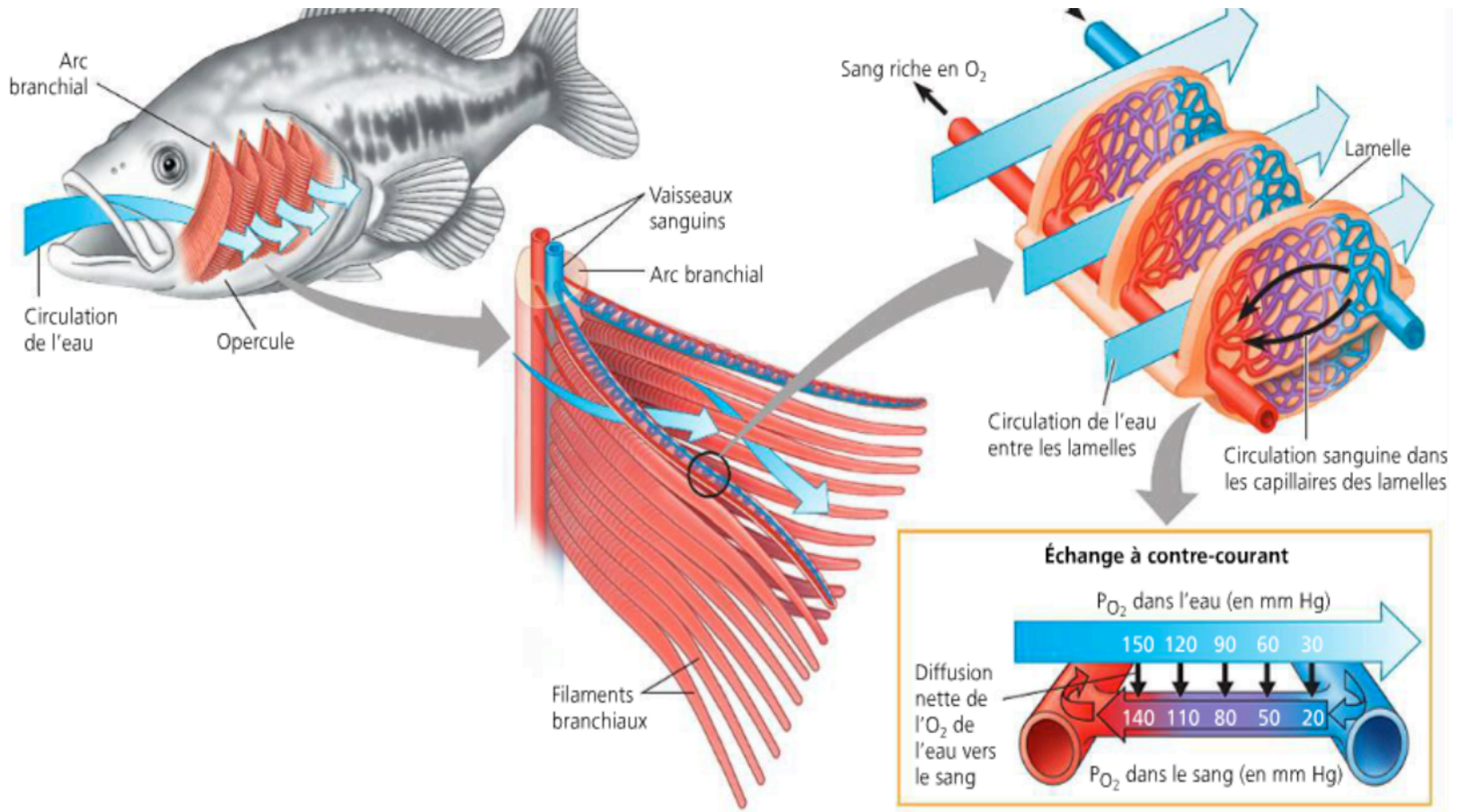


Figure 11 : appareil respiratoire d'un poisson téléostéen

Organisation d'une lamelle respiratoire

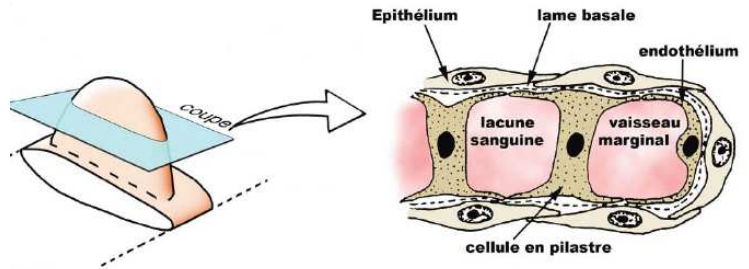


Figure 12 : appareil circulatoire ouvert d'un bivalve

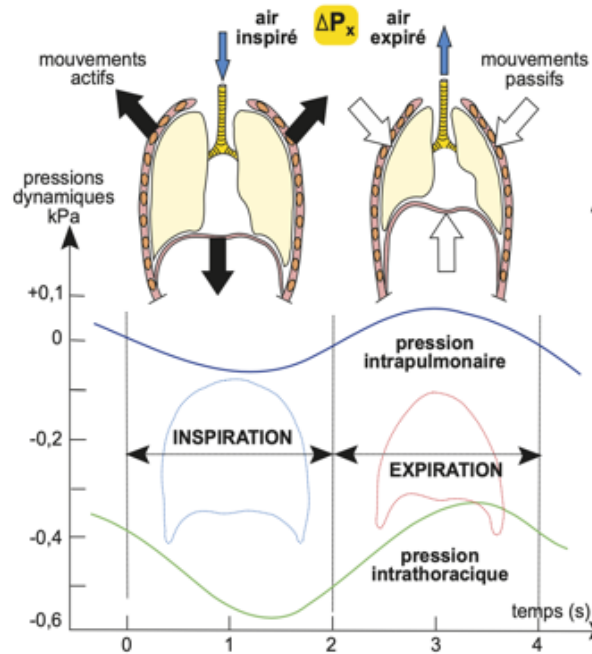
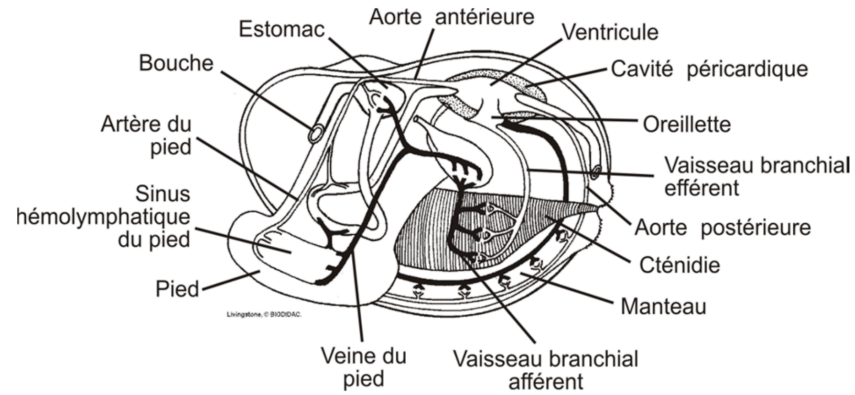
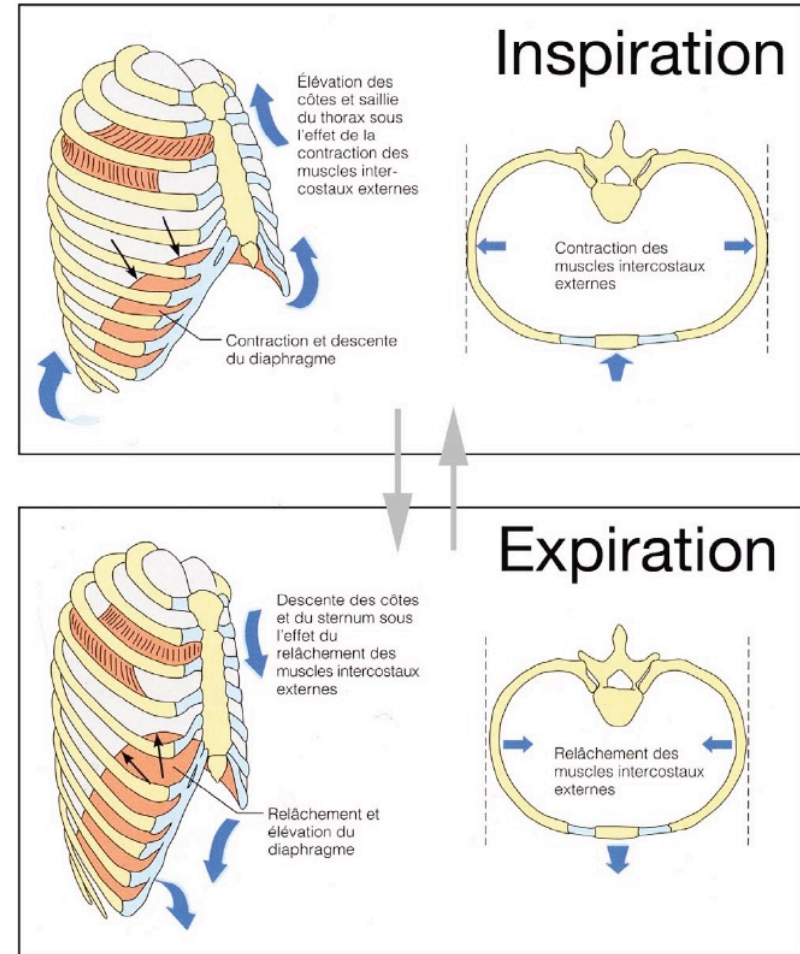
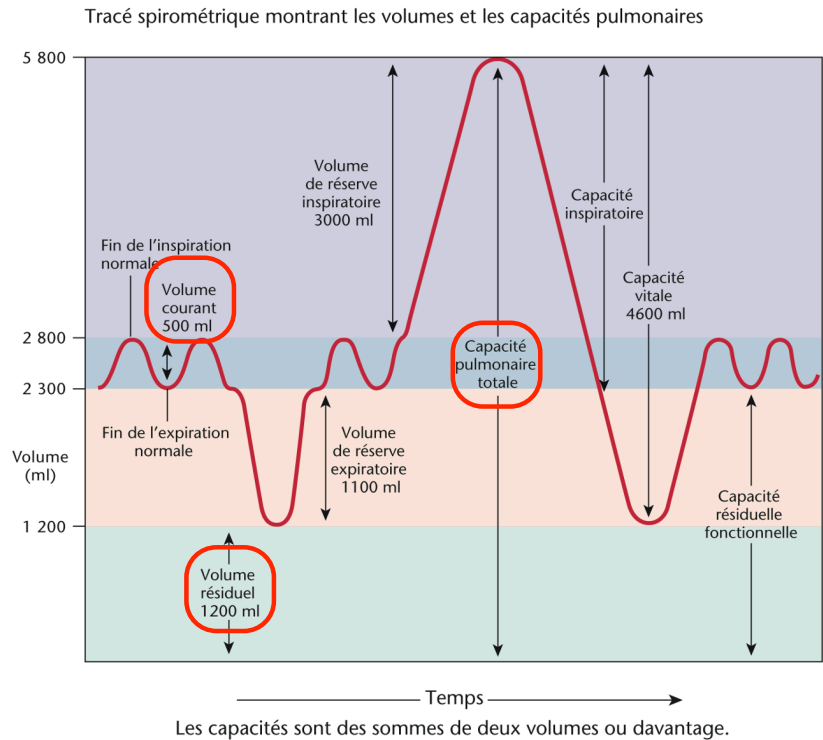
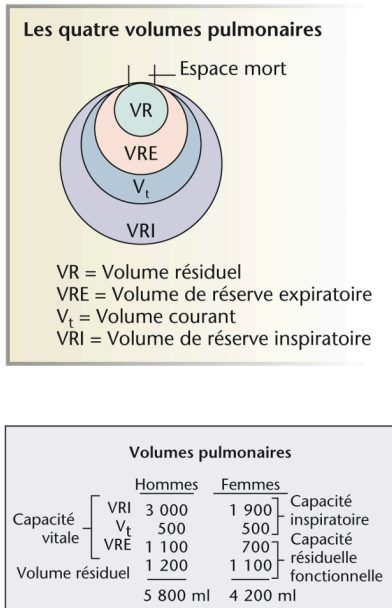


Figure 13 : ventilation bidirectionnelle et thoraco-abdominale des Mammifères



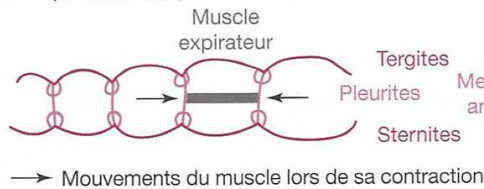


© Pearson Education France

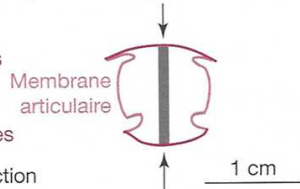
**Figure 14 : Activité musculaire et mouvements ventilatoires chez les insectes (Denoeud et al. 2011).**

• La ventilation est assurée par deux types de mouvements ventilatoires : des mouvements en accordéon et des mouvements dorso-ventraux (Fig. ). L'expiration est active, alors que l'inspiration est passive.

**1** Mouvements en accordéon (CL d'Insecte)



**2** Mouvements dorso-ventraux (CT d'Insecte)

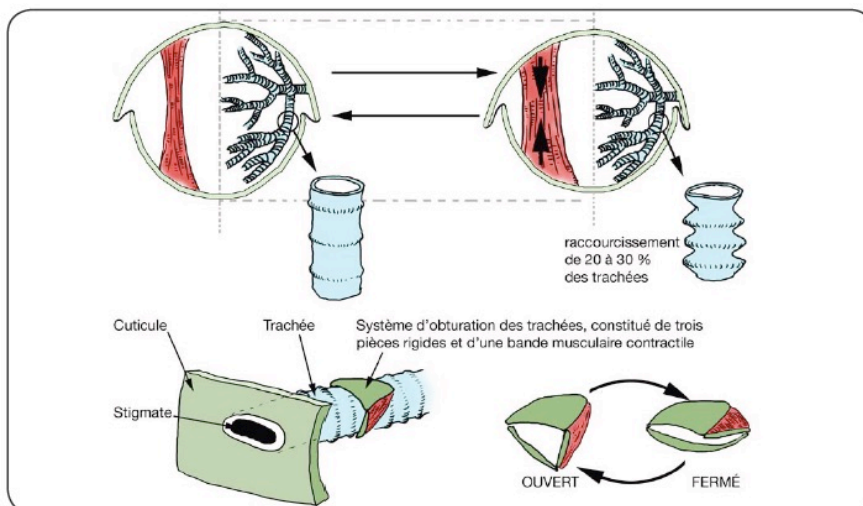


Figure

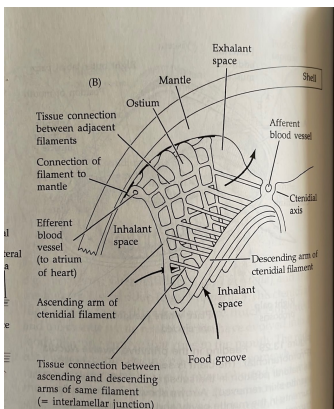
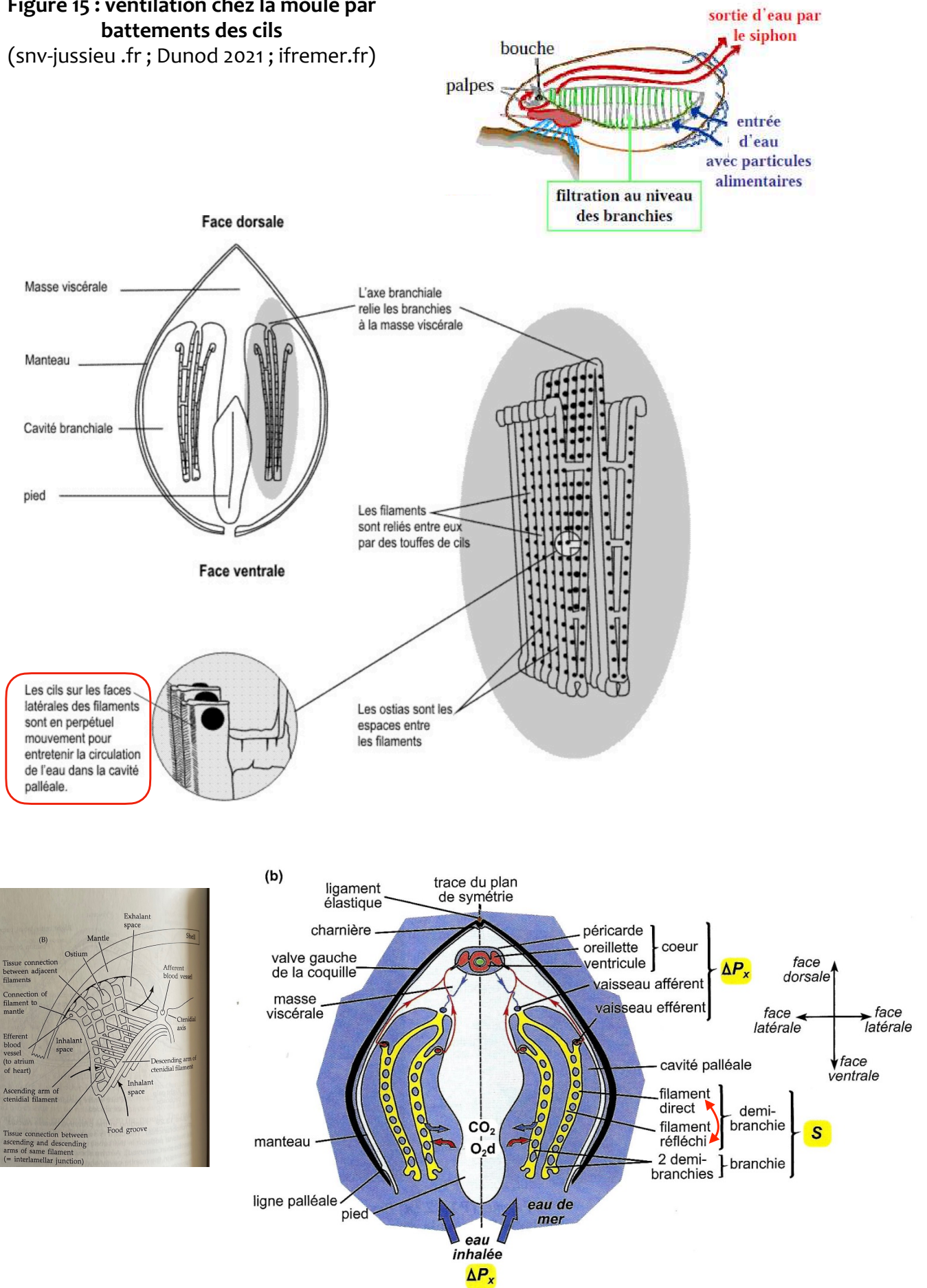
Mouvements ventilatoires de la respiration trachéenne.

La ventilation est régulée par les ganglions cérébroïdes qui sont sensibles à la pression partielle en dioxyde de carbone et contrôlent les ganglions métathoraciques (qui agissent sur les muscles de la ventilation).

Chez les grands Insectes, des sacs aériens sont présents entre les muscles du vol ce qui permet un meilleur brassage de l'air et une amélioration de la ventilation.

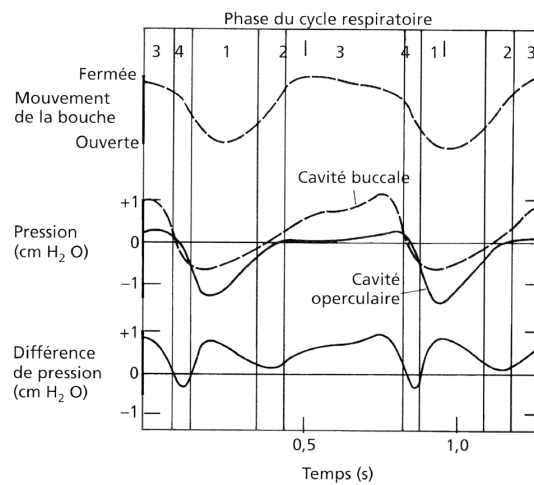
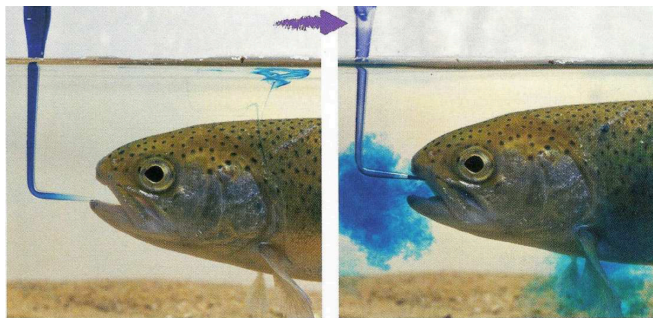


**Figure 15 : ventilation chez la moule par battements des cils**  
(snv-jussieu .fr ; Dunod 2021 ; ifremer.fr)

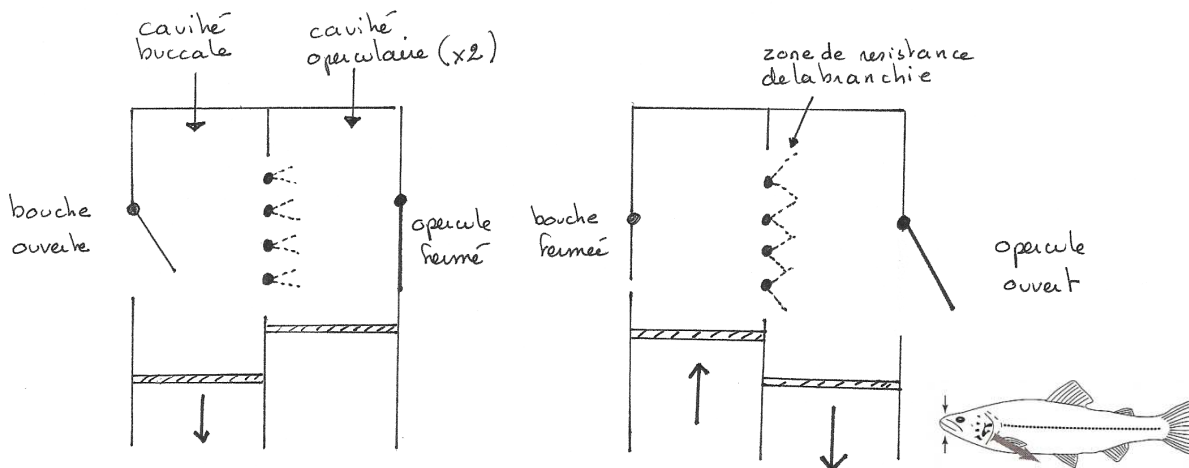


**Figure 16 : ventilation bucco-pharyngée chez les téléostéens**

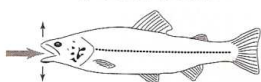
Si on dépose du bleu de méthylène dans la bouche du Poisson, on retrouve le colorant sortant par les ouïes. Il y a un **courant unidirectionnel** d'eau qui baignent les branchies.



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.



Inspiration:  
entrée d'eau liée à l'abaissement du plancher buccal



Expiration  
- remonte du plancher buccal  
- abaissement du plancher pharyngien  
→ sortie d'eau par l'opercule

**Figure 17 : contre courant chez les téléostéens (milieu pauvre en O<sub>2</sub>), comparé aux échanges pulmonaires**  
(in Dunod, 2022)

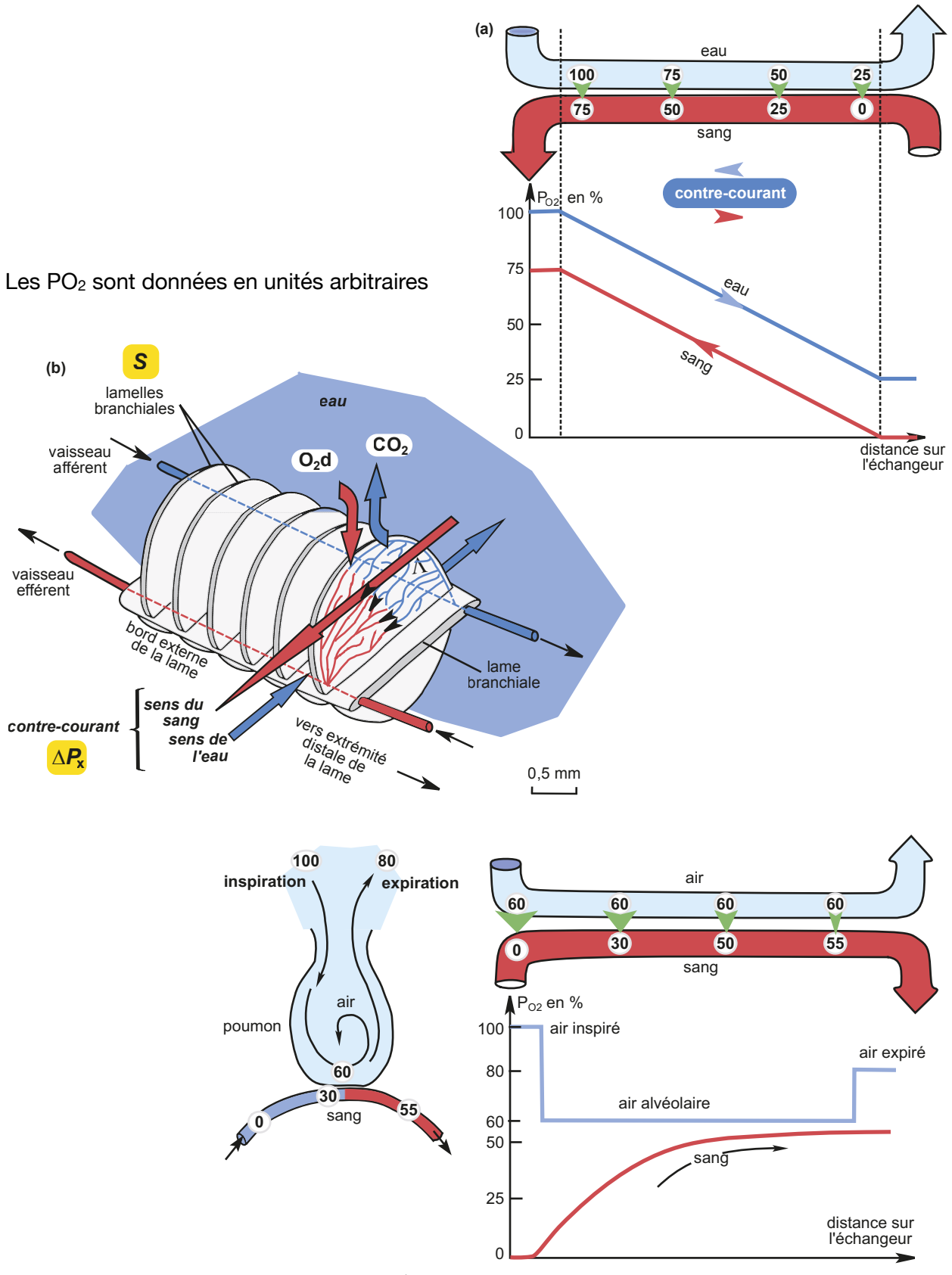
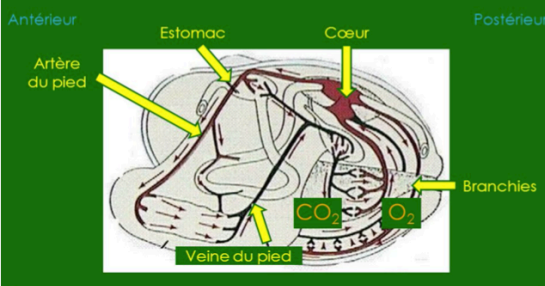
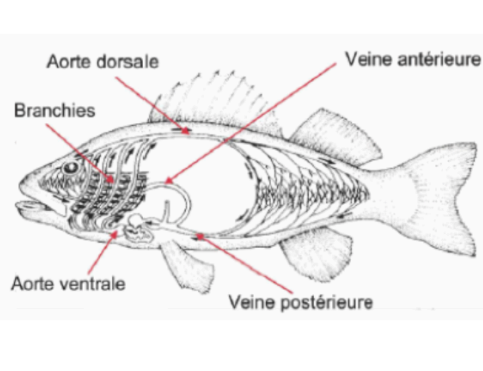
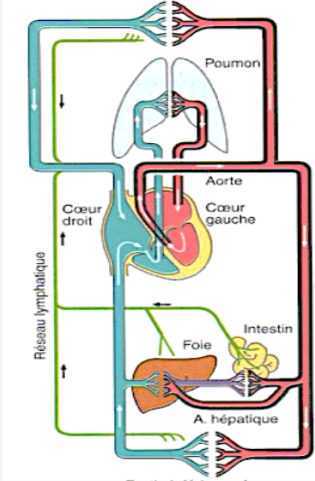
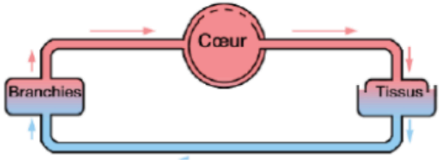
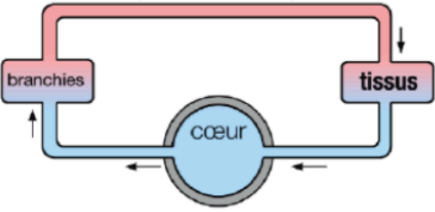
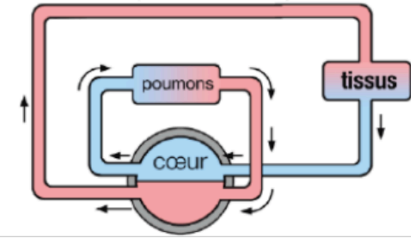




Figure 18 : convection interne par les appareils cardio-vasculaires

<p><b>Bivalve :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- appareil ouvert</li> <li>- simple circulation</li> </ul>	<p><b>Téléostéen :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- appareil clos</li> <li>- simple circulation</li> </ul>	<p><b>Mammifère :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- appareil clos</li> <li>- double circulation</li> </ul>
 <p><a href="https://slideplayer.fr/slide/1189980/">https://slideplayer.fr/slide/1189980/</a></p>		
		

**Figure 19 : convection interne par les appareils cardio-vasculaires**  
(in Rieutort)

Transporteurs (et masses moléculaires)	Métal	Groupement prosthétique	Forme	Groupes zoologiques
Hémocyanine (300 000 à $9 \cdot 10^6$ )	Cuivre	Non	Dissoute	Mollusques, nombreux Crustacés, Arachnides
Hémérythrine (108 000)	Fer	Non	Dans les érythrocytes	Annélides Polychètes (certaines), Sipunculides
Chlorocruorine (2 750 000)	Fer	Une porphyrine	Dissoute	Annélides Polychètes (certaines)
Hémoglobine (17 000 à $3 \cdot 10^6$ )	Fer	Une proto- porphyrine	Dissoute ou dans des érythrocytes	Vertébrés, des Annélides, des Crustacés, Mollusques, certains Protozoaires...

**Figure 20 : pouvoir oxyphorique du sang**

Chez l'Homme, le pouvoir oxyphorique du sang est de 20 % du volume (20 mL d'O<sub>2</sub> pour 100 mL de sang). La fraction d'O<sub>2</sub> dissous est très faible (environ 0,3 %), la présence de l'hémoglobine **augmente** donc **fortement** la **capacité de prise en charge d'O<sub>2</sub>** par le sang.

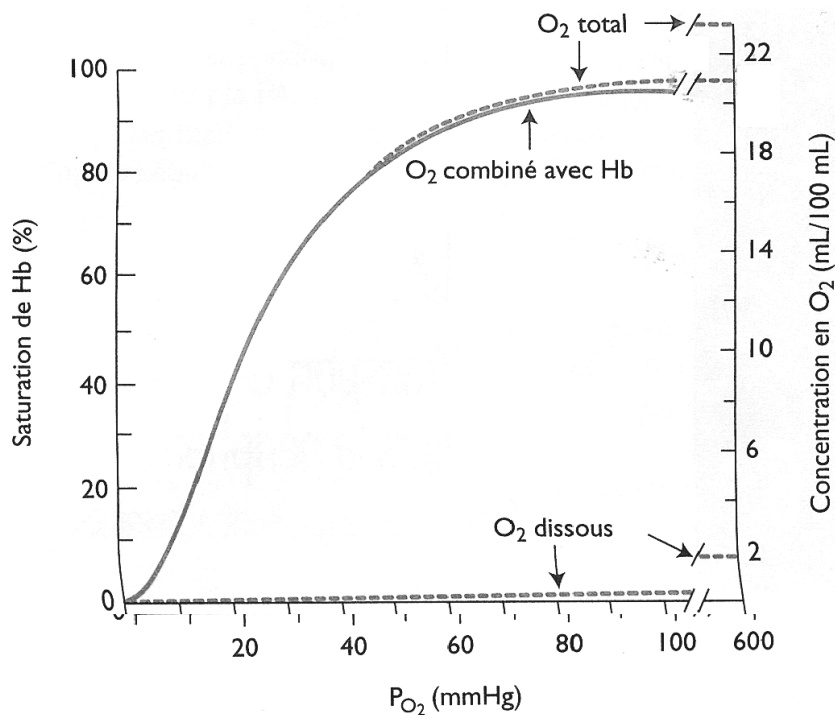
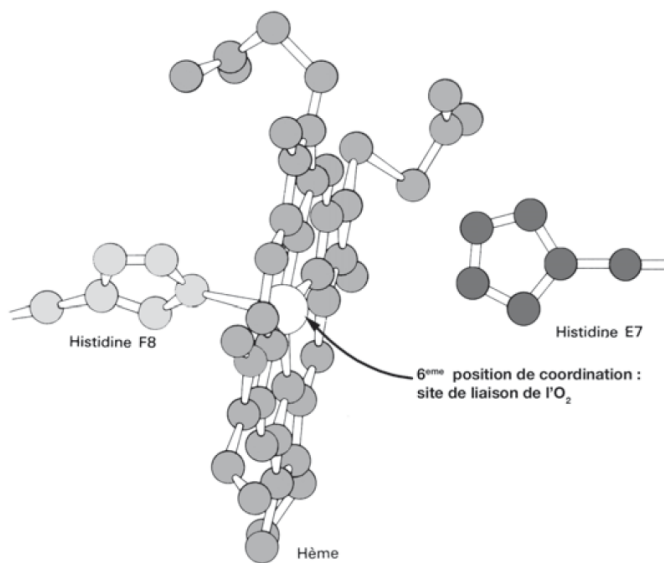
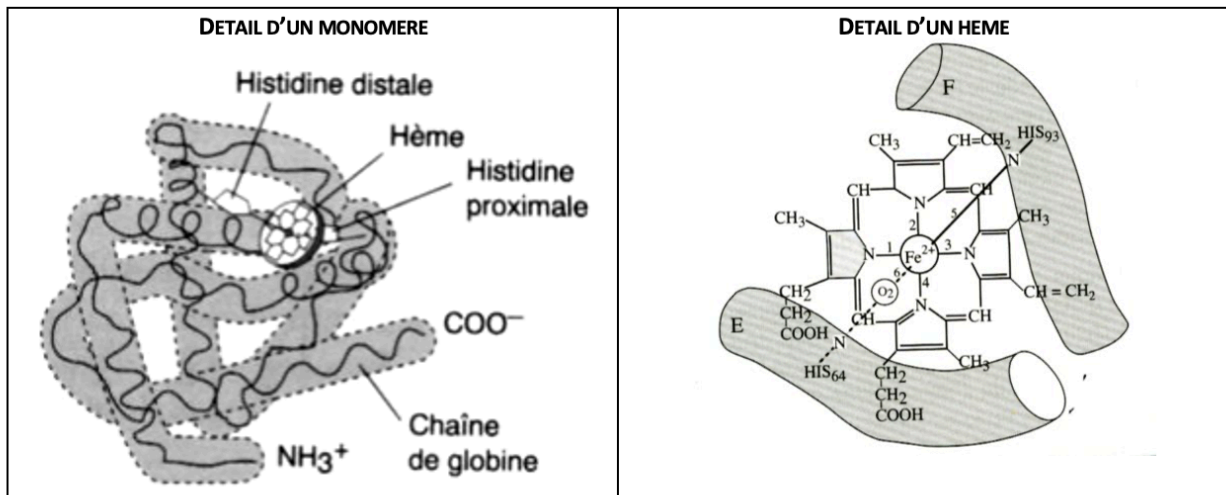
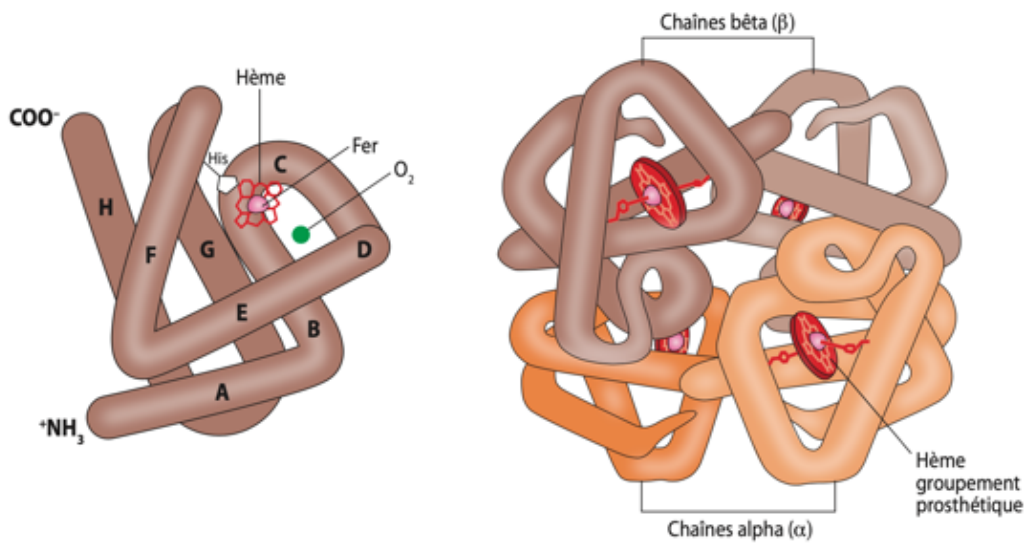


Figure 21 : structure de l'hémoglobine



**L'hème et les Histidines**

*L'atome de Fer établit quatre liaisons covalentes avec le noyau tétrapyrolique et une cinquième liaison avec l'histidine F8 (= le huitième radical du tronçon F d'hélice α de la Globine).*

*Il reste donc un site de coordination libre : c'est le site de fixation de l'O<sub>2</sub>.*

*Face à ce site se tient l'histidine E7 (qui n'établit pas de liaison avec le Fe).*

Figure 22 : courbe de dissociation de l'hémoglobine

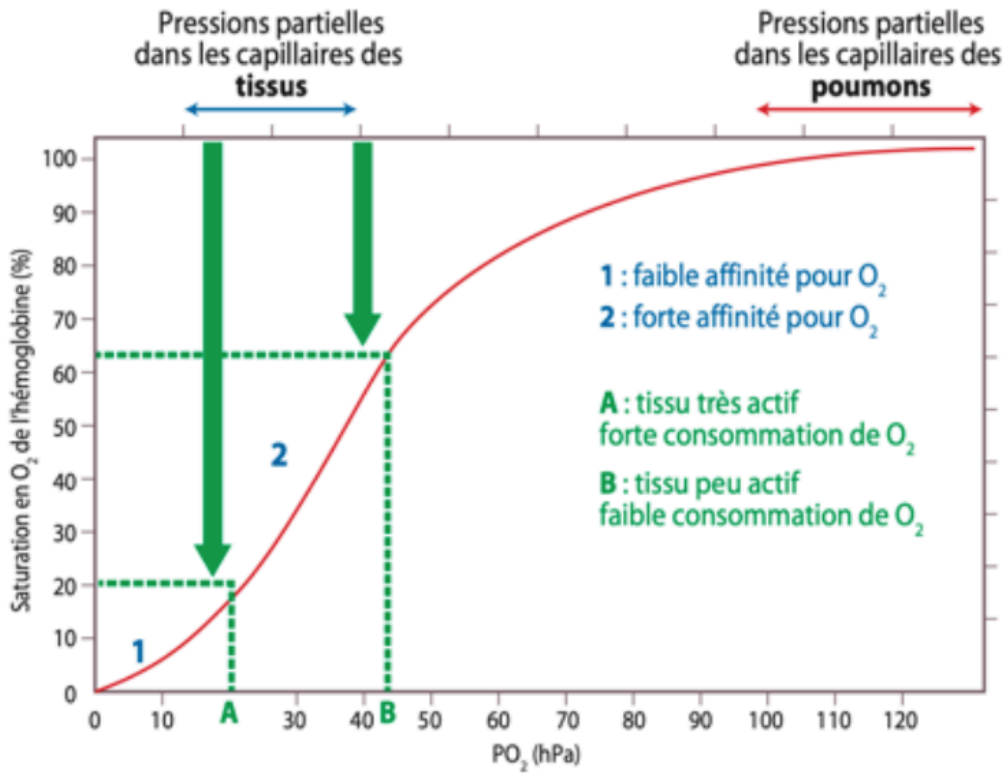
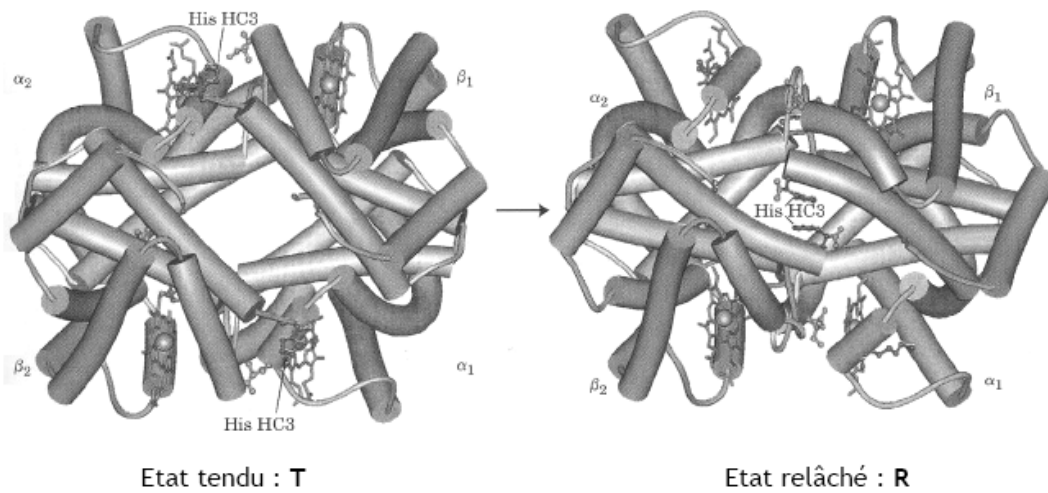
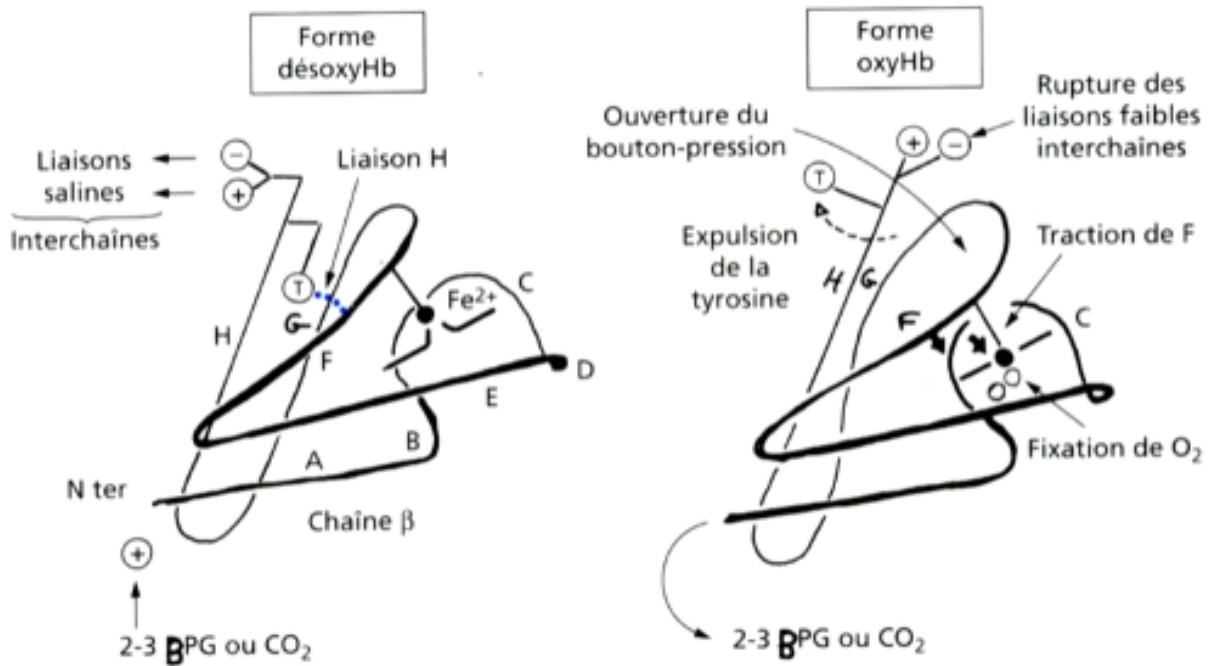
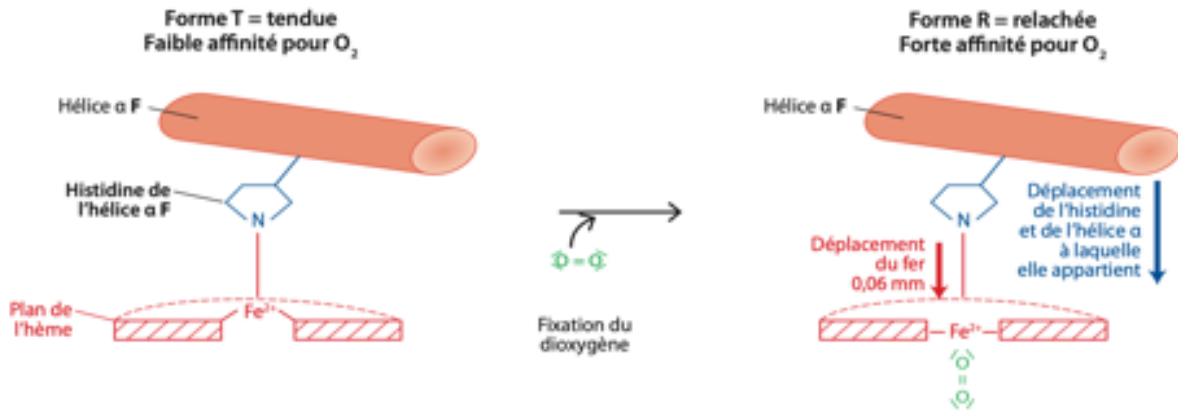
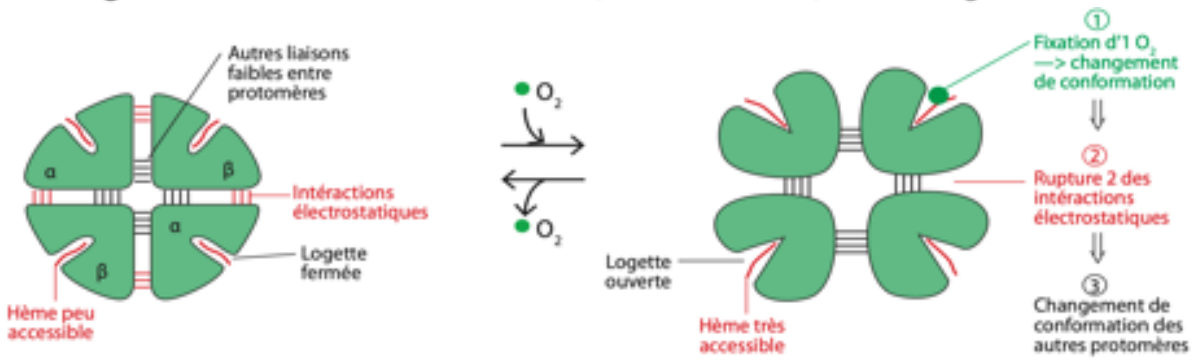
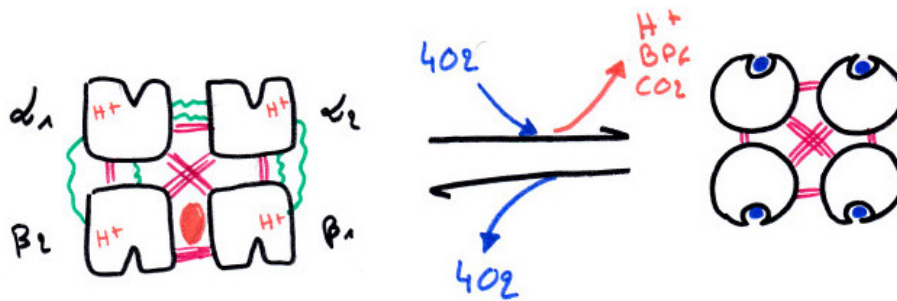
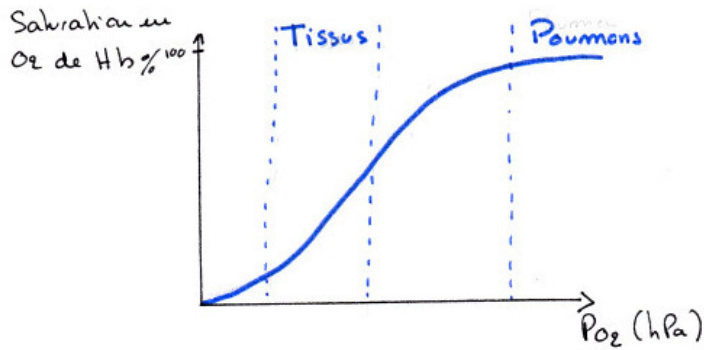


Figure 23 : transition allostérique

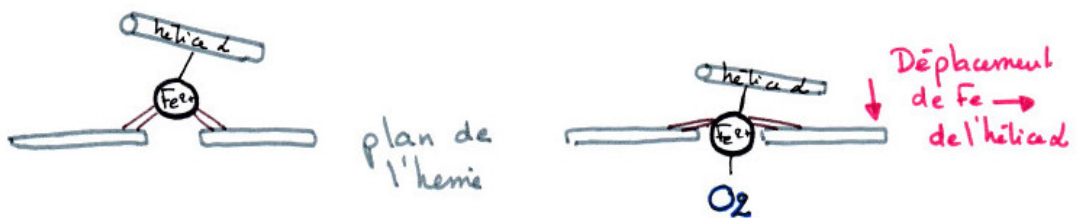




**SCHEMAS à CONNAITRE**

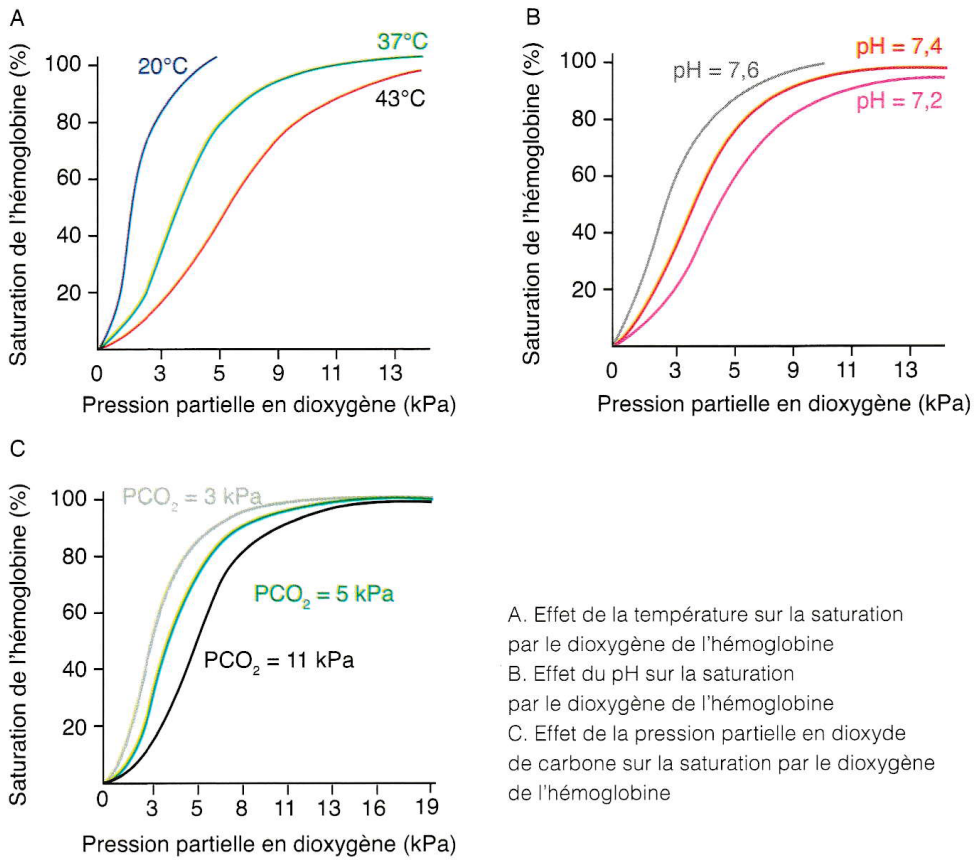


- Liens ioniques rompus lors de la fixation de  $O_2$
- == Liens hydrophobes
- 2.3 BPG
- $H^+$  fixation sur les aa des chaînes  $\alpha$  et  $\beta$
- $CO_2$  Fixation sur les extrémités  $NH_2$ :  $NH_2 \rightarrow NH-COO^-$

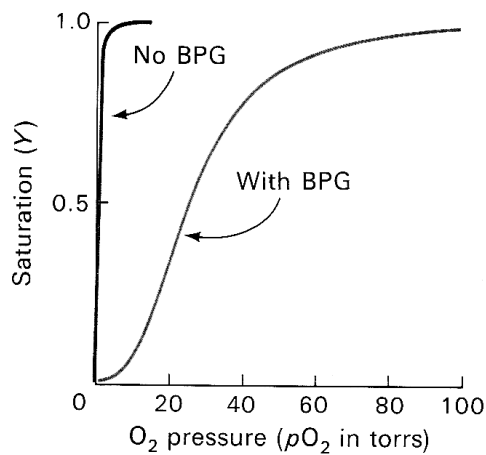


- Liens entre  $Fe^{2+}$  et 4N de l'hème
- Liens entre  $Fe^{2+}$  et une histidine d'une hélice  $\alpha$  de la globine.

**Figure 24 : contrôle de la fixation du dioxygène**  
(Ellipse 2015)



**Effet du 2,3BPG**



2,3-Bisphosphoglycerate (BPG) decreases the oxygen affinity of hemoglobin.

Figure 25 : transport du CO<sub>2</sub> dans le sang

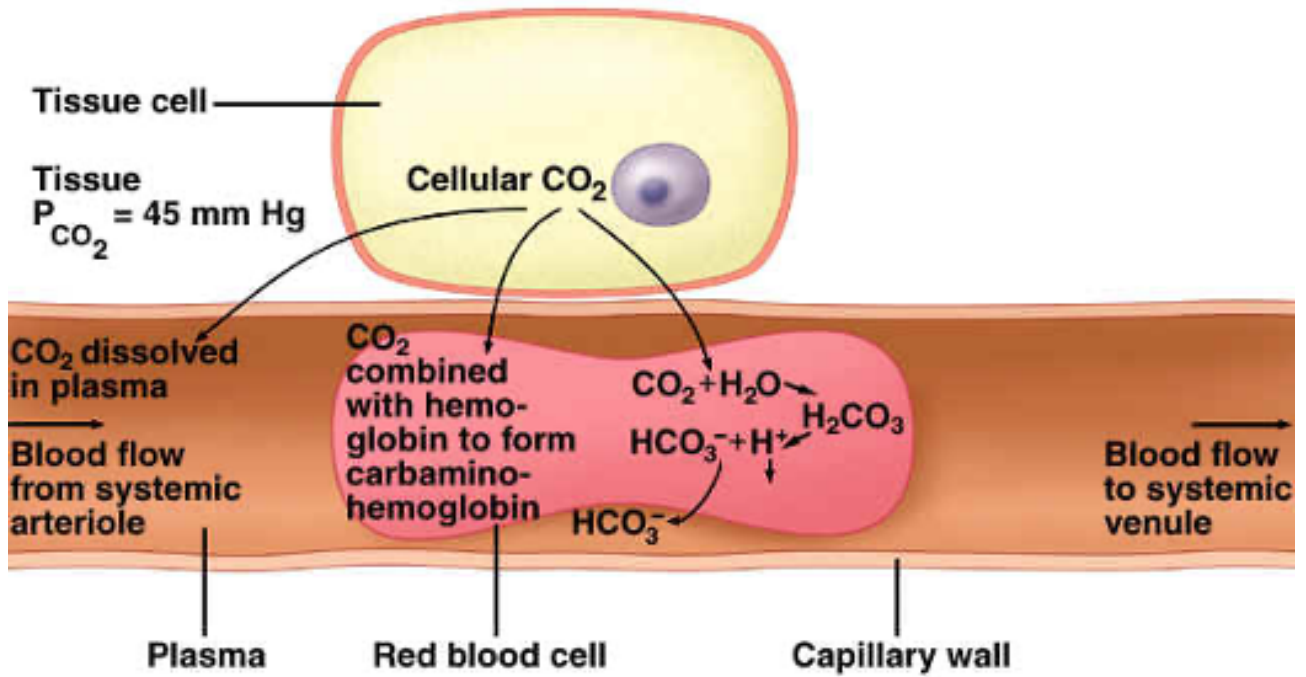
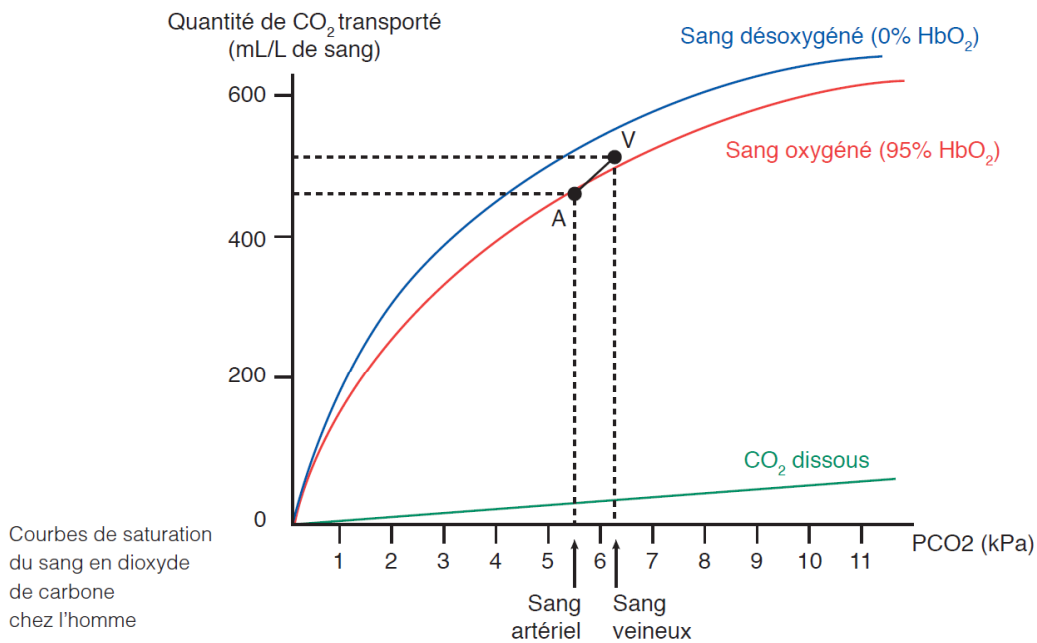


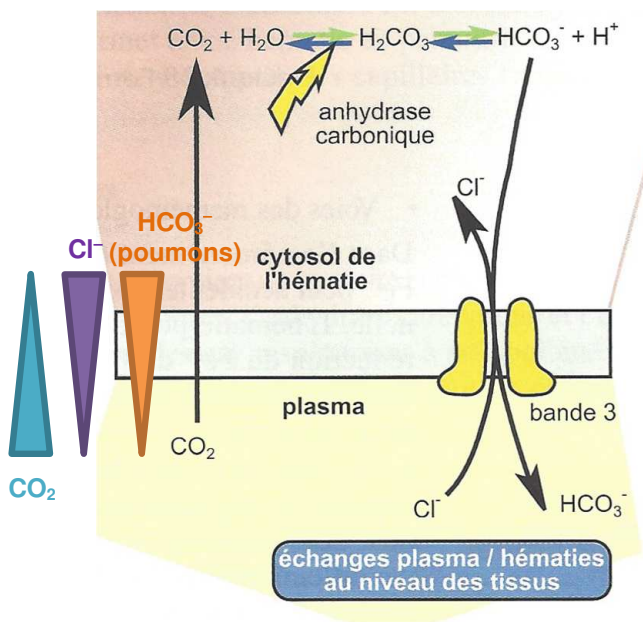
Figure 26 : Effet Haldane  
(in Segarra et al. 2015)



Dans les conditions physiologiques, les variations s'inscrivent entre les points A (sang artériel) et V (sang veineux), qui n'est pas complètement désoxygéné.



**Figure 27 : échangeur anionique bande 3**  
(Pecru et al., 2014, Tanguy Jean)



On parle d'effet Hamburger (du nom du scientifique néerlandais qui l'a mis en évidence) pour désigner ce transfert réversible d'ions chlorures par association avec le transfert d'ions hydrogène-carbonates.

Figure 28 : échanges gazeux au niveau des poumons et des tissus

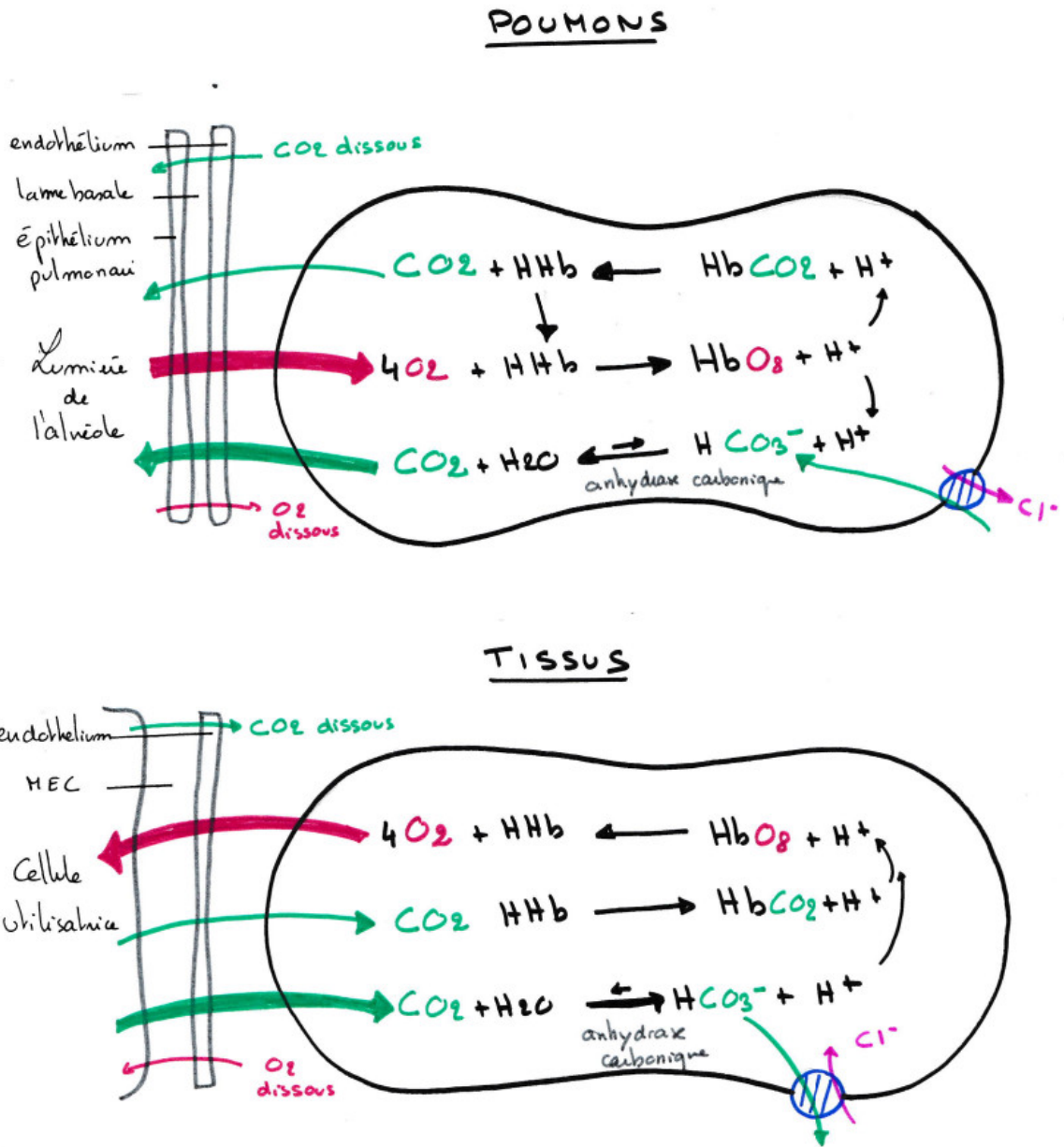
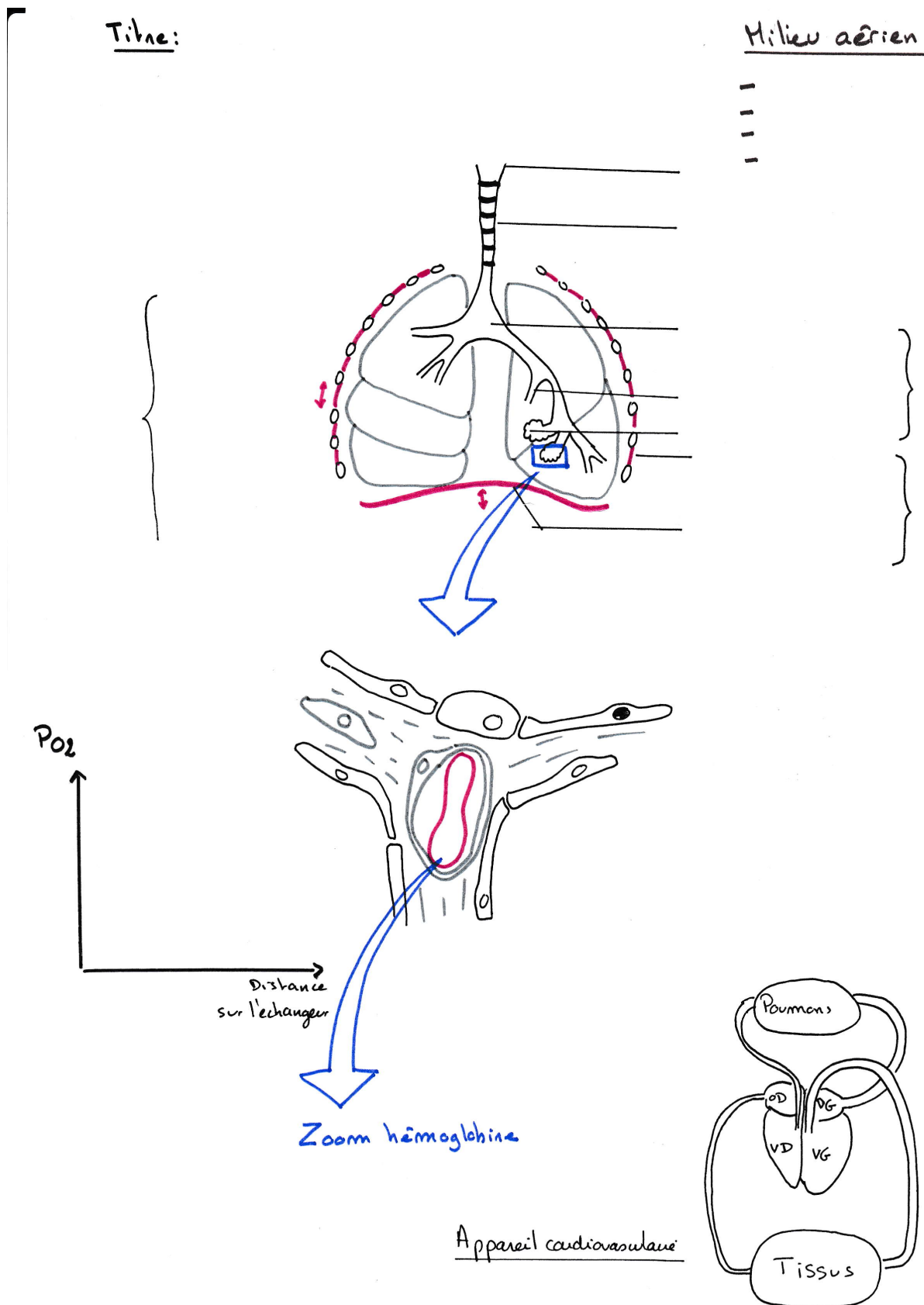
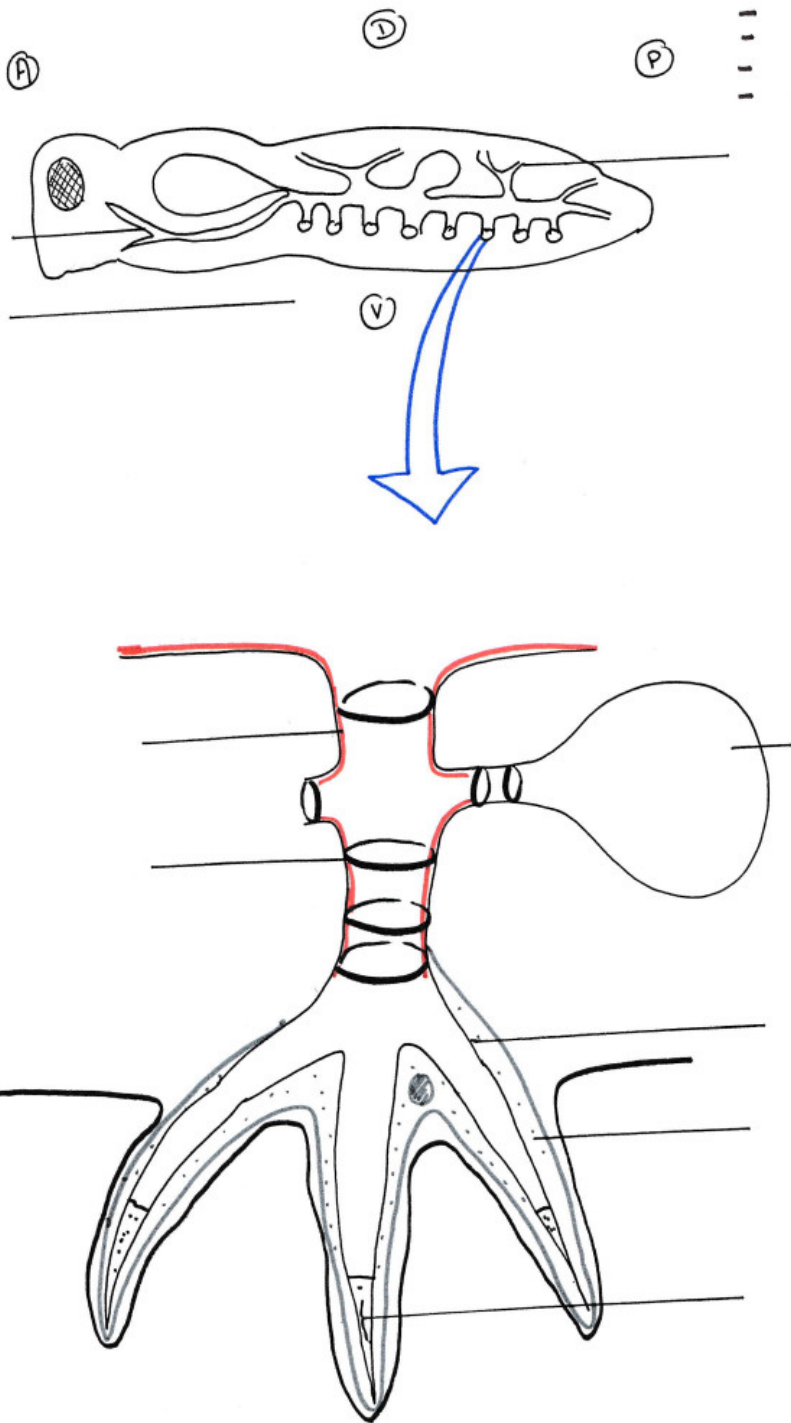


Figure 29 : 4 schémas bilan

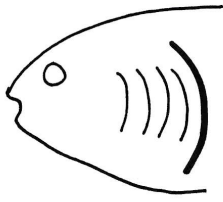


Titre :

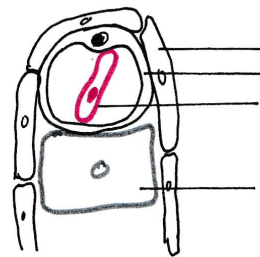
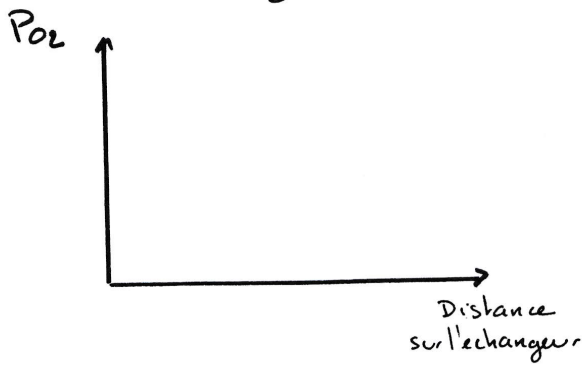
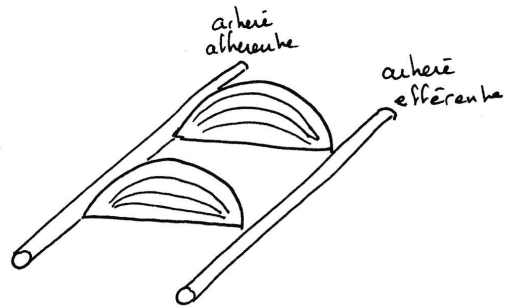
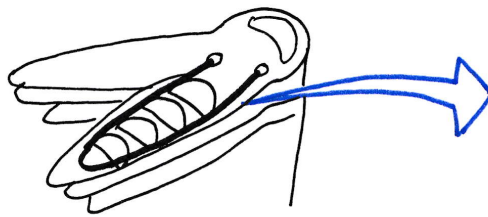
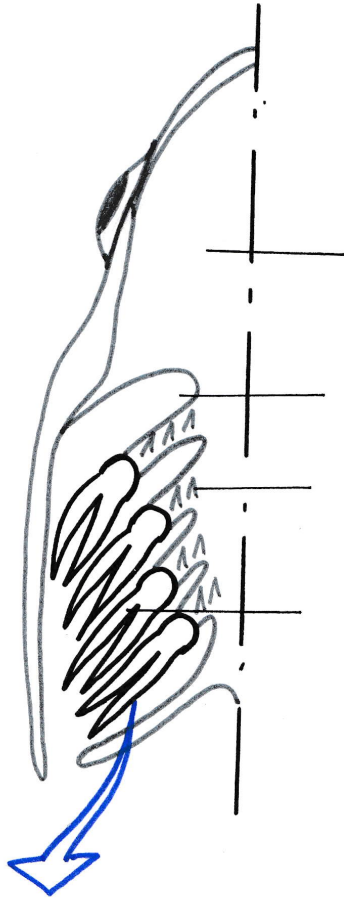
Milieu aërien



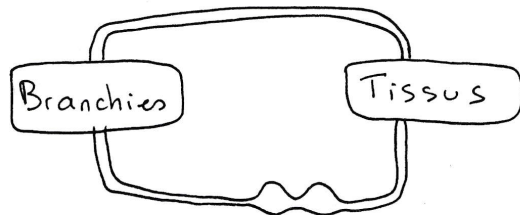
Titre :



Milieu aquatique :



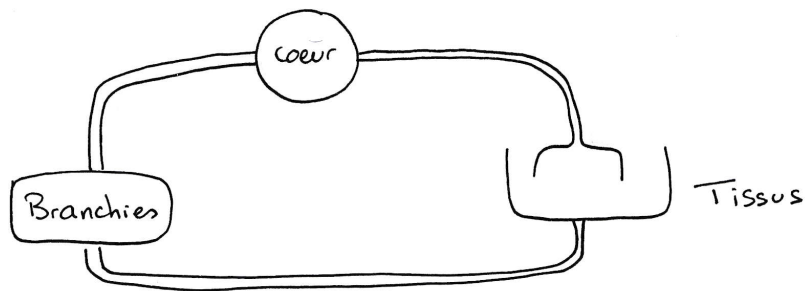
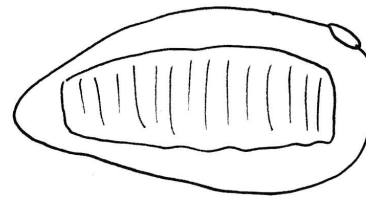
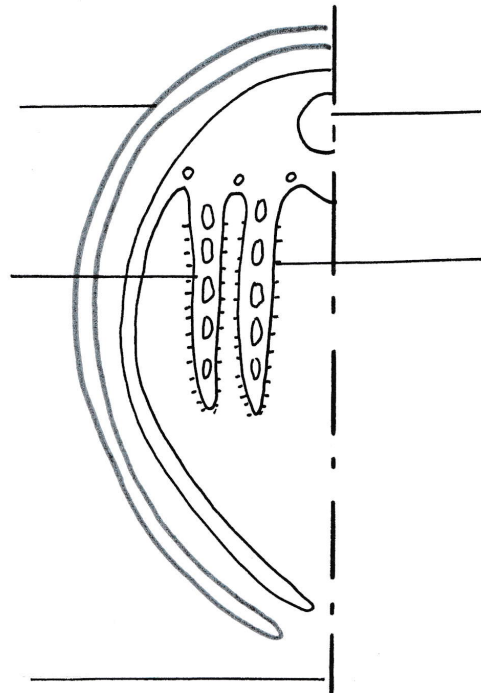
Appareil cardiovasculaire



Titre :

Milieu aquatique.

-  
-  
-

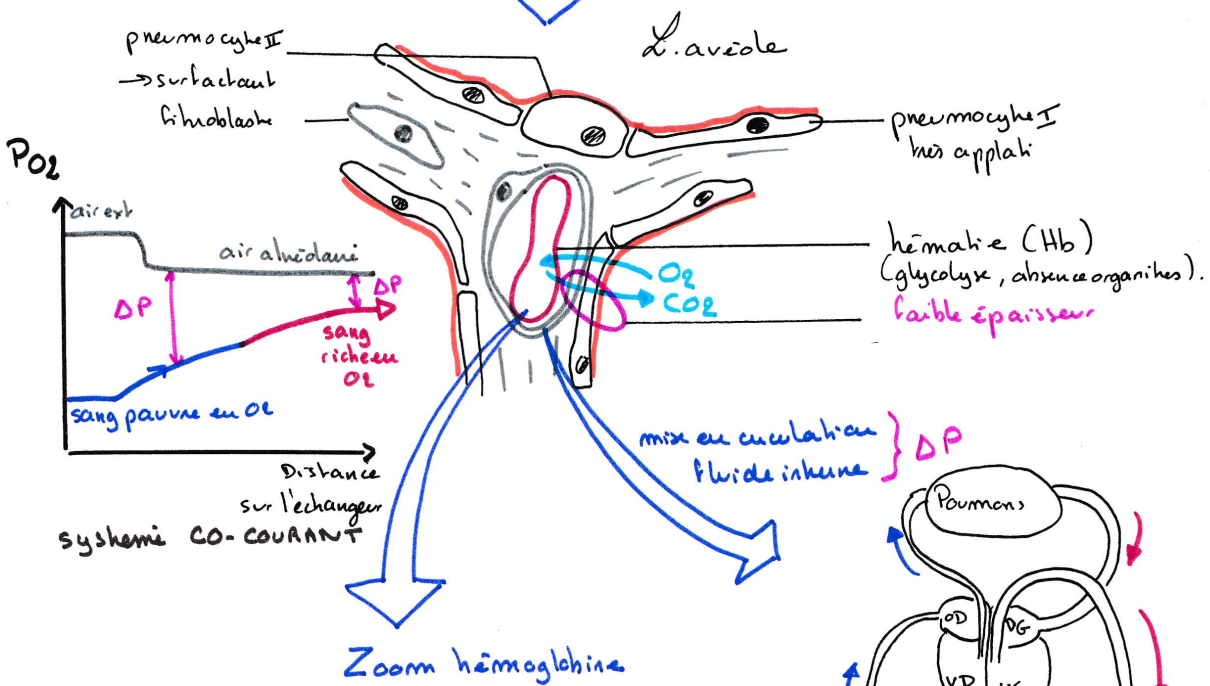
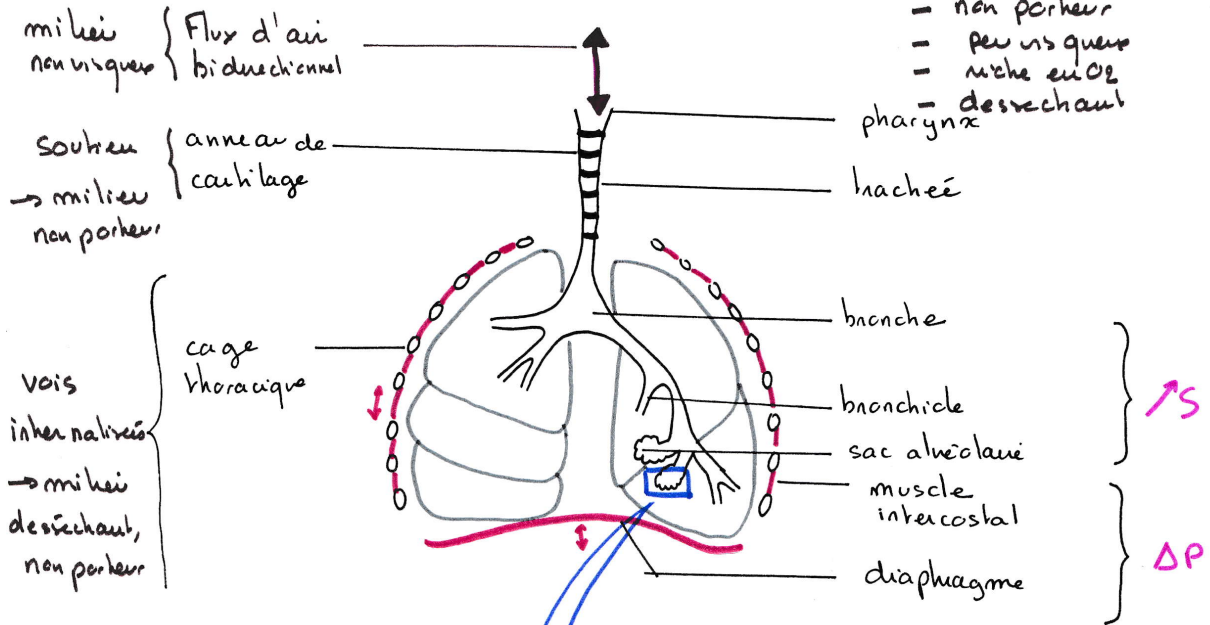


Appareil cardiovasculaire

**CORRIGES des Schémas Bilans**

Titre: Appareil pulmonaire des Mammifères

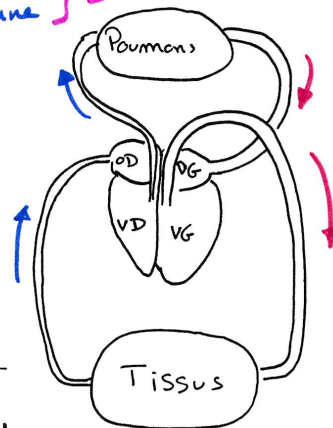
Milieu aérien



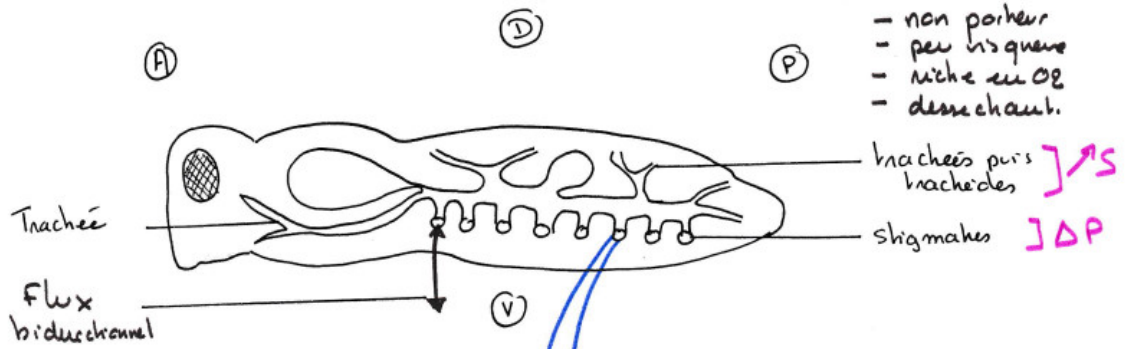
Appareil cardiovasculaire

↑ ΔP

appareil clos + double circulation

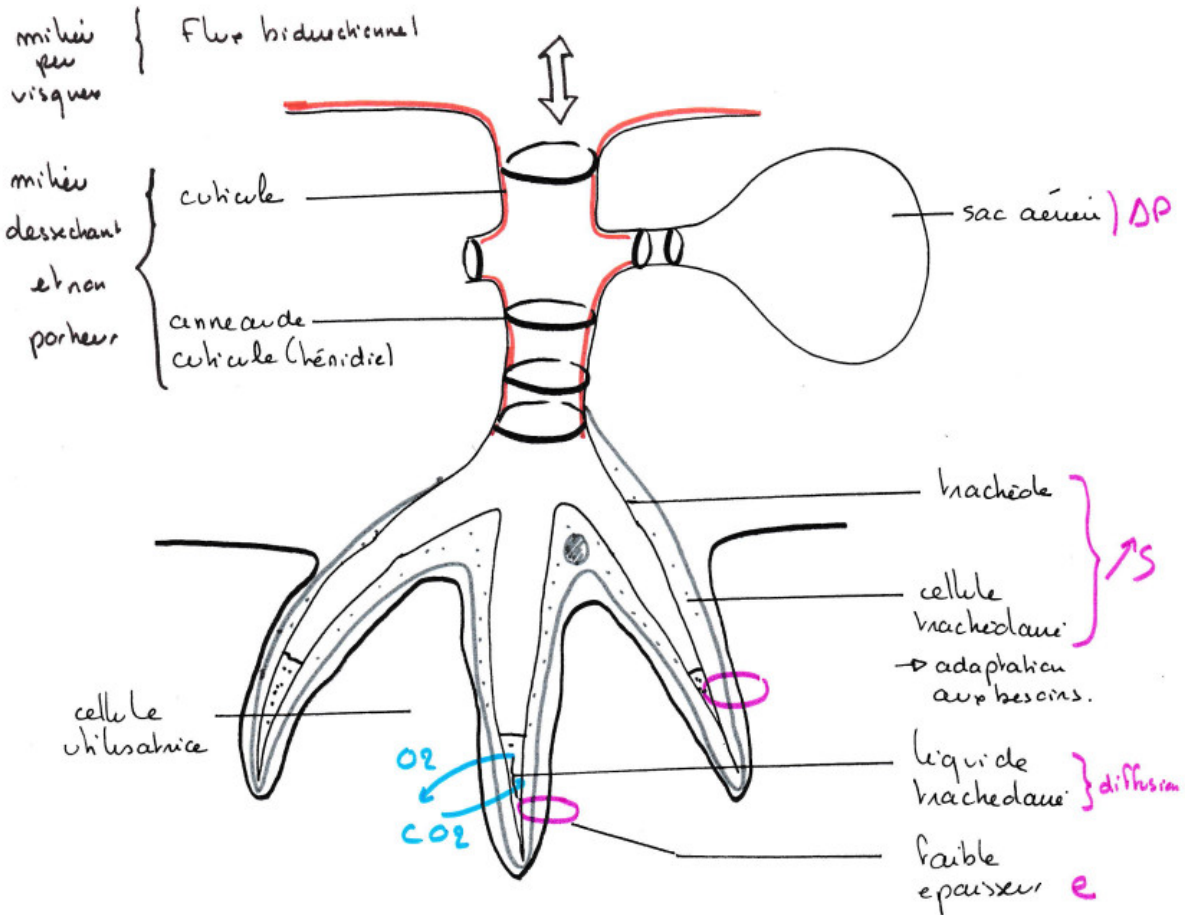


Tête :



Milieu aérien

- non porteur
- peu visqueux
- riche en O<sub>2</sub>
- desséchant.

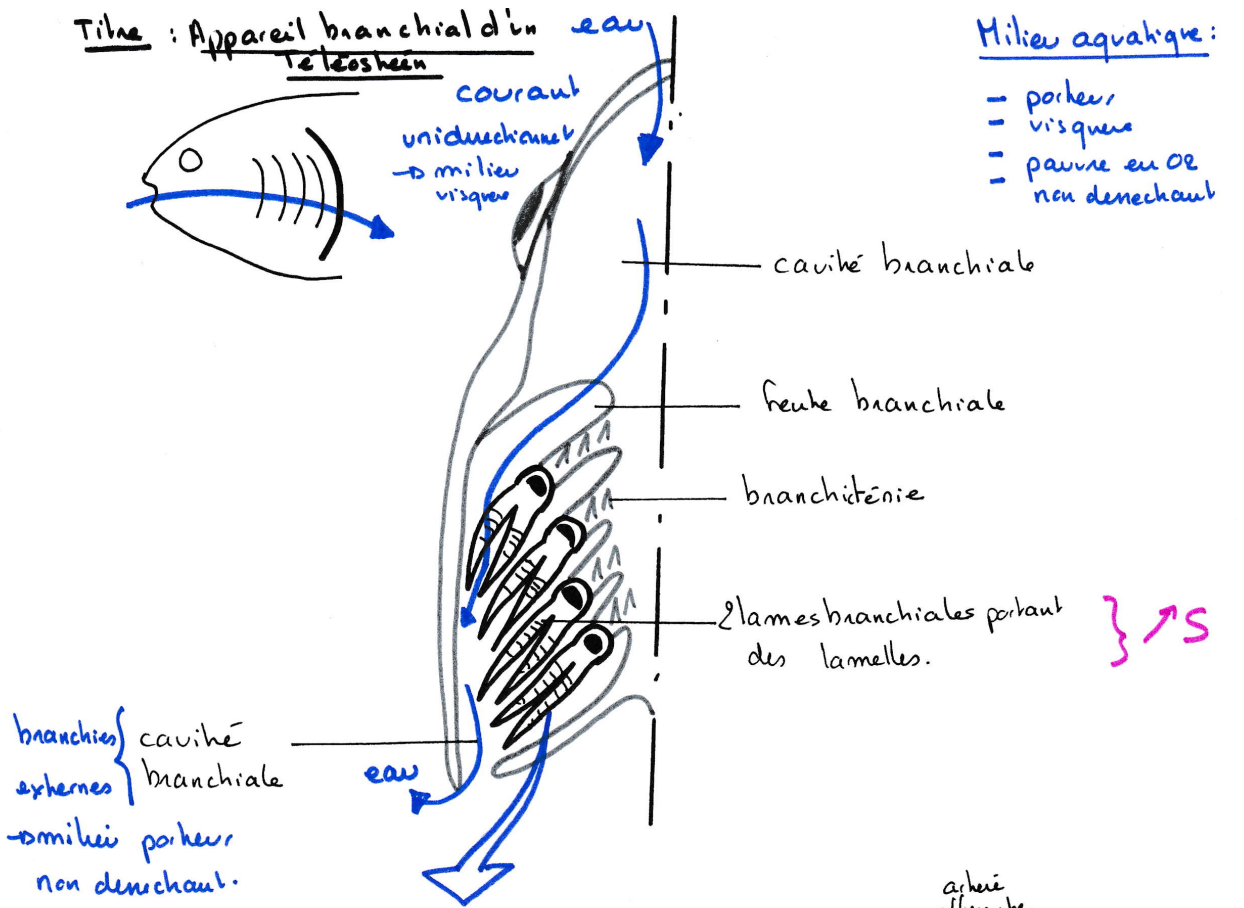




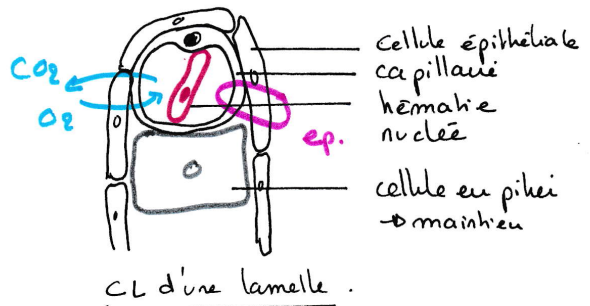
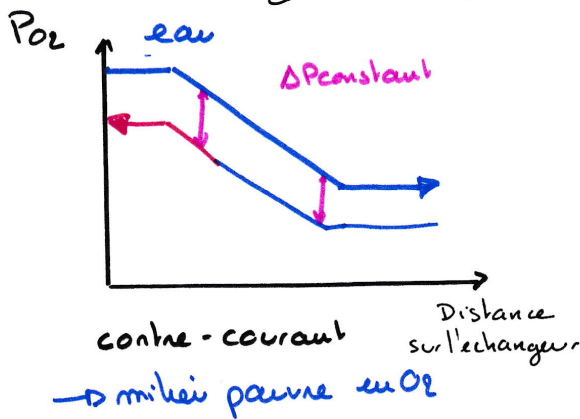
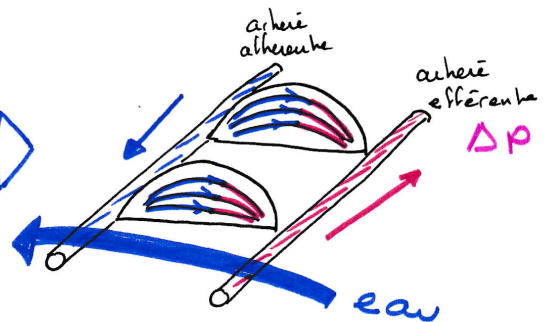
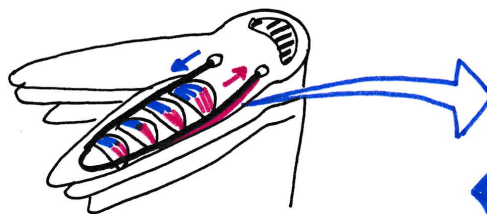
Titre : Appareil branchial d'un téléostéen

Milieu aquatique :

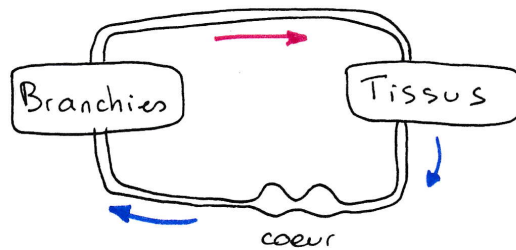
- porteur
- visqueux
- pauvre en O<sub>2</sub>
- non détrechant



branches externes } cavité branchiale  
 → milieu porteur non détrechant.



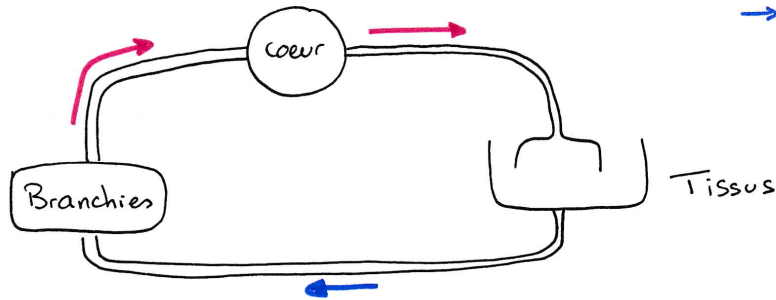
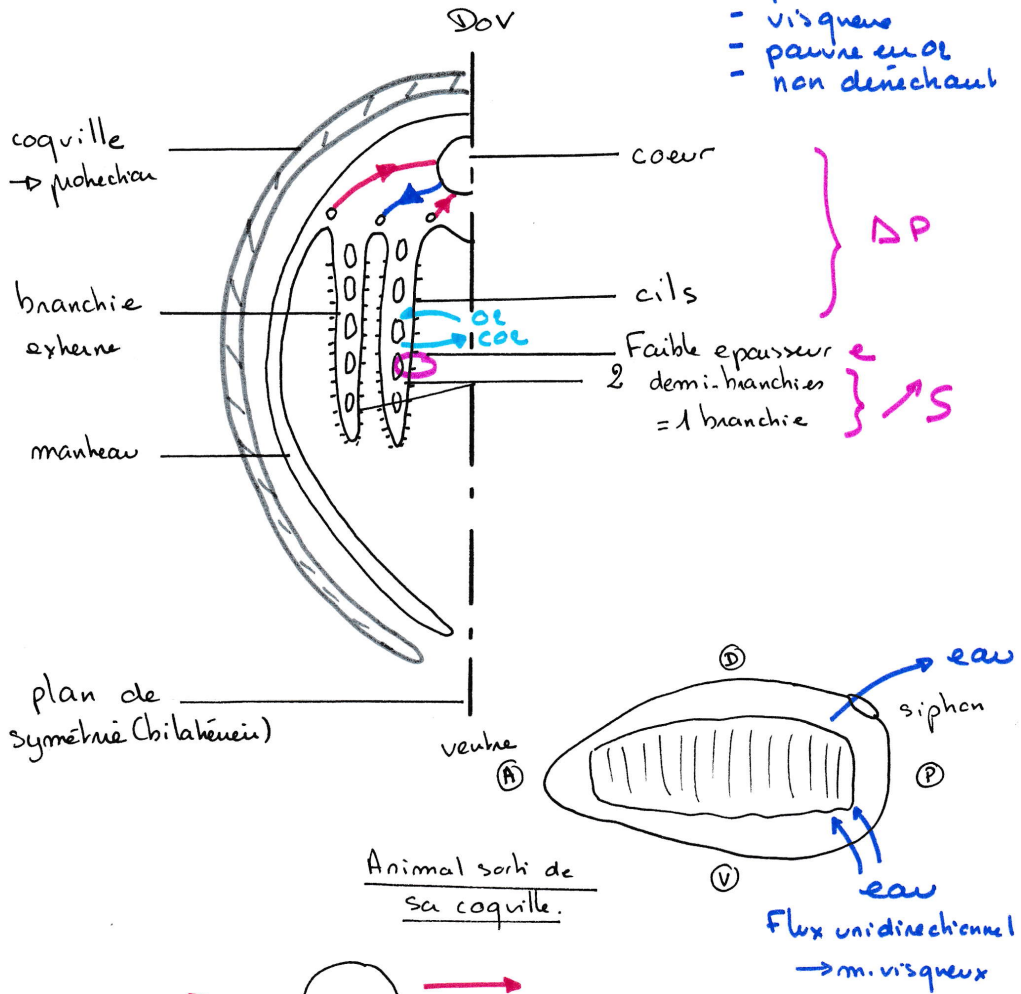
Appareil cardiovasculaire  
 appareil clos + 1 seule boucle



Titre : Appareil respiratoire branchial de la Moule

Milieu aquatique.

- poreux
- visqueux
- pauvre en O<sub>2</sub>
- non dense/chaud



Appareil cardiovasculaire

Appareil ouvert -> hémolymphe + 1 seule circulation.