



UNIVERSITÉ
BORDEAUX
S E G A L E N

Licence Biologie - UE Biologie animale

Les appareils respiratoires des Métazoaires

Étienne Roux

*Adaptation cardiovasculaire à l'ischémie INSERM U 1034
UFR des Sciences de la Vie Université Bordeaux Segalen*

contact: etienne.roux@u-bordeaux2.fr

support de cours :

*plateforme pédagogique l'UFR des sciences de la Vie
e-fisio.net*

*plan du cours et descriptif de compétences (format pdf)
diaporama du cours (format ppt)*

position du problème

le problème du dioxygène (et du dioxyde de carbone)

Pourquoi le dioxygène est-il important pour les animaux ?

production d'énergie par la cellule : respiration cellulaire (mitochondrie)

respiration cellulaire :

consommation d'oxygène et production de CO₂

Quel problème pose le dioxygène ?

apport de dioxygène au niveau des cellules suffisant pour permettre la production d'énergie nécessaire à la couverture des besoins

quel problème pose de dioxyde de carbone ?

élimination par l'organisme du CO₂ produit par la respiration cellulaire

position du problème

le problème du dioxygène (et du dioxyde de carbone)

Quel problème pose le dioxygène ?

apport de dioxygène au niveau des cellules suffisant pour permettre la production d'énergie nécessaire à la couverture des besoins

quel problème pose de dioxyde de carbone ?

élimination par l'organisme du CO_2 produit par la respiration cellulaire

→ diffusion des gaz entre le milieu extérieur et le milieu intérieur

→ diffusion des gaz dans le milieu intérieur

milieu extérieur : gazeux (vie aérienne) aqueux (vie aquatique)

milieu intérieur : aqueux

plan

I. position du problème

II. le problème de l'O₂ et du CO₂

A. données physiques

B. air et eau

III. caractéristiques fonctionnelles d'un appareil respiratoire

A. caractéristiques générales

B. spécificité des milieux

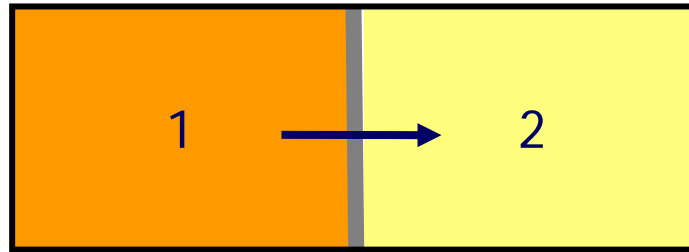
IV. les différents appareils respiratoires

A. respiration aquatique

B. respiration aérienne

V. origine du poumon des Tétrapodes

loi de diffusion d'un gaz entre deux compartiments



loi de Fick

(exprimée par rapport à la différence de pression partielle du gaz entre deux compartiments 1 et 2) :

$$dV/dt = (S/E) \times D \times (P_1 - P_2)$$

dV/dt : débit du gaz à travers la membrane de diffusion

S : surface de diffusion

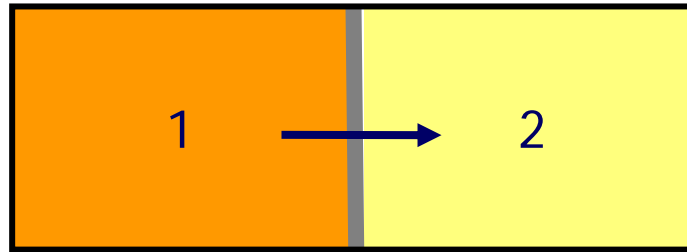
E : épaisseur

D : coefficient de diffusion

$P_1 - P_2$: gradient de pression partielle entre les deux compartiments

loi de diffusion d'un gaz entre deux compartiments

loi de Fick



$$dV/dt = (S/E) \times D \times (P1-P2)$$

interface

- ◆ surface importante
- ◆ épaisseur faible

pression partielle

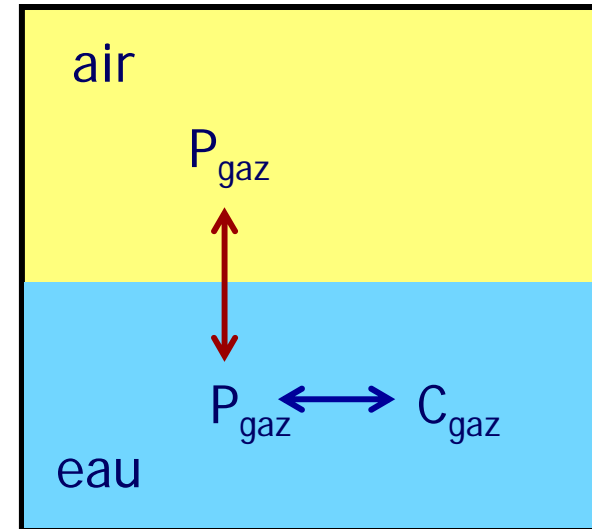
- ◆ gradient de pression

coefficient de diffusion

- ◆ nature du gaz
- ◆ nature du milieu

dissolution d'un gaz dans un liquide

- ➔ les pressions partielles en gaz (P_{gaz}) s'équilibrent entre les compartiments gazeux et liquidiens
- ➔ la concentration de gaz dissous C_{gaz} dépend de P_{gaz} dans le liquide et de la solubilité du gaz (sol_{gaz})



Loi de Henry

$$C_{\text{gaz}} = \text{Sol}_{\text{gaz}} \times P_{\text{gaz}}$$

rapport entre gaz dissous et pression partielle

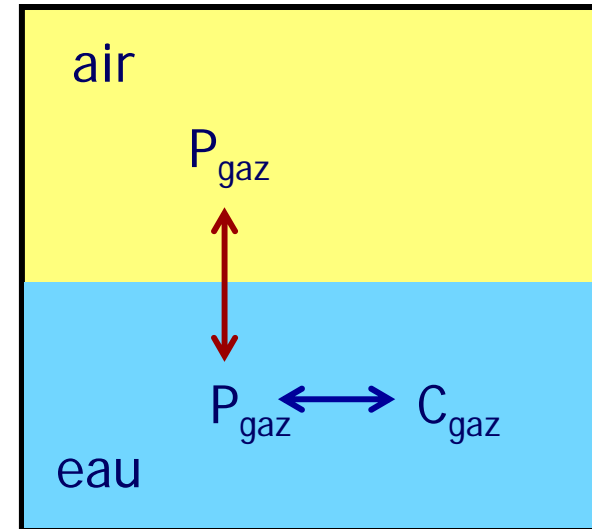
dissolution d'un gaz dans un liquide

Loi de Henry

$$C_{\text{gaz}} = \text{Sol}_{\text{gaz}} \times P_{\text{gaz}}$$

solubilité d'un gaz

- ◆ nature du gaz
- ◆ nature du milieu
- ◆ température



concentration et pression partielle en O₂

composition gazeuse de l'air sec en %

<i>composant</i>	<i>%</i>
O ₂	20,95
CO ₂	0,05
N ₂	78,09
Argon	0,93

pression atmosphérique au niveau de la mer : 760 mm Hg (101,3 kPa)

pression partielle en gaz = fraction en gaz x pression totale

$$PO_2 = 159 \text{ mm Hg}$$

concentration et pression partielle en O₂

milieu (18°C)	[O ₂] (mL.L ⁻¹)	PO ₂ (mmHg)
air	210	159
eau de mer	7	159
eau saumâtre	<7	159
eau douce	2 à 10	159

Loi de Henry

T (°C)	[O ₂] (mL.L ⁻¹)	
	eau douce	eau de mer
0	10,29	7,97
10	8,02	6,35
15	7,22	5,79
20	6,57	5,31
30	5,57	4,46

$$C_{\text{gaz}} = \text{Sol}_{\text{gaz}} \times P_{\text{gaz}}$$

- solubilité d'un gaz
- ◆ nature du gaz
 - ◆ nature du milieu
 - ◆ température

caractéristiques des deux milieux

	<i>milieu aquatique</i>	<i>milieu aérien</i>
viscosité (cP)	1	0,02
densité (kg.l ⁻¹)	1,000	0,0013
chaleur spécifique (cal. l ⁻¹ .C ^{°-1})	1000	0,31
concentration en O ₂ (l.l ⁻¹)	0,007	0,209
litre de milieu par litre O ₂	143	4,8
kg de milieu par litre O ₂	143	0,0062
coefficient de diffusion D _{O₂} (cm ² . s ⁻¹)	2,5x10 ⁻⁵	1,98x10 ⁻¹

les contraintes sont-elles les mêmes pour la respiration aquatique et la respiration aérienne ?

caractéristiques des deux milieux

	<i>milieu aquatique</i>	<i>milieu aérien</i>
viscosité (cP)	1	0,02
densité (kg.l ⁻¹)	1,000	0,0013
chaleur spécifique (cal. l ⁻¹ .C ^{°-1})	1000	0,31
concentration en O ₂ (l.l ⁻¹)	0,007	0,209
litre de milieu par litre O ₂	143	4,8
kg de milieu par litre O ₂	143	0,0062
coefficient de diffusion D _{O₂} (cm ² . s ⁻¹)	2,5x10 ⁻⁵	1,98x10 ⁻¹

→ Il y a plus de dioxygène dans l'air que dans l'eau

caractéristiques des deux milieux

	<i>milieu aquatique</i>	<i>milieu aérien</i>
viscosité (cP)	1	0,02
densité (kg.l ⁻¹)	1,000	0,0013
chaleur spécifique (cal. l ⁻¹ .C ^{°-1})	1000	0,31
concentration en O ₂ (l.l ⁻¹)	0,007	0,209
litre de milieu par litre O ₂	143	4,8
kg de milieu par litre O ₂	143	0,0062
coefficient de diffusion D _{O₂} (cm ² . s ⁻¹)	2,5x10 ⁻⁵	1,98x10 ⁻¹

→ le dioxygène diffuse mieux dans l'air que dans l'eau

caractéristiques des deux milieux

	<i>milieu aquatique</i>	<i>milieu aérien</i>
viscosité (cP)	1	0,02
densité (kg.l ⁻¹)	1,000	0,0013
chaleur spécifique (cal. l ⁻¹ .C ^{°-1})	1000	0,31
concentration en O ₂ (l.l ⁻¹)	0,007	0,209
litre de milieu par litre O ₂	143	4,8
kg de milieu par litre O ₂	143	0,0062
coefficient de diffusion D _{O₂} (cm ² . s ⁻¹)	2,5x10 ⁻⁵	1,98x10 ⁻¹

→ il est énergiquement plus coûteux de mobiliser une quantité donnée de dioxygène dans l'eau que dans l'air

caractéristiques des deux milieux

	<i>milieu aquatique</i>	<i>milieu aérien</i>
viscosité (cP)	1	0,02
densité (kg.l ⁻¹)	1,000	0,0013
chaleur spécifique (cal. l ⁻¹ .C ^{°-1})	1000	0,31
concentration en O ₂ (l.l ⁻¹)	0,007	0,209
litre de milieu par litre O ₂	143	4,8
kg de milieu par litre O ₂	143	0,0062
coefficient de diffusion D _{O₂} (cm ² . s ⁻¹)	2,5x10 ⁻⁵	1,98x10 ⁻¹

→ les échanges thermiques sont plus importants en milieu aquatique

contraintes générales : les limites de la diffusion

diffusion du dioxygène faible

→ lorsque le rayon de l'animal dépasse quelque millimètres, la simple diffusion de l'O₂ ne suffit pas à assurer un apport d'O₂ couvrant les besoins métaboliques

→ nécessité d'un système spécialisé

- ◆ échange gazeux entre l'animal et le milieu
- ◆ le renouvellement du milieu extérieur
- ◆ la distribution des gaz dans l'organisme

réponses fonctionnelles aux contraintes

↘ assurer les échanges gazeux (O_2 et CO_2) entre le milieu extérieur et l'animal

→ *interface milieu-animal*

↘ assurer le renouvellement du milieu au niveau de la surface d'échange

→ *pompe : ventilation*

↘ assurer le transport des gaz dans l'organisme

→ *diffusion / circulation / pigments*

↘ être efficace :

→ *moduler les échanges en fonction des besoins (régulation)*

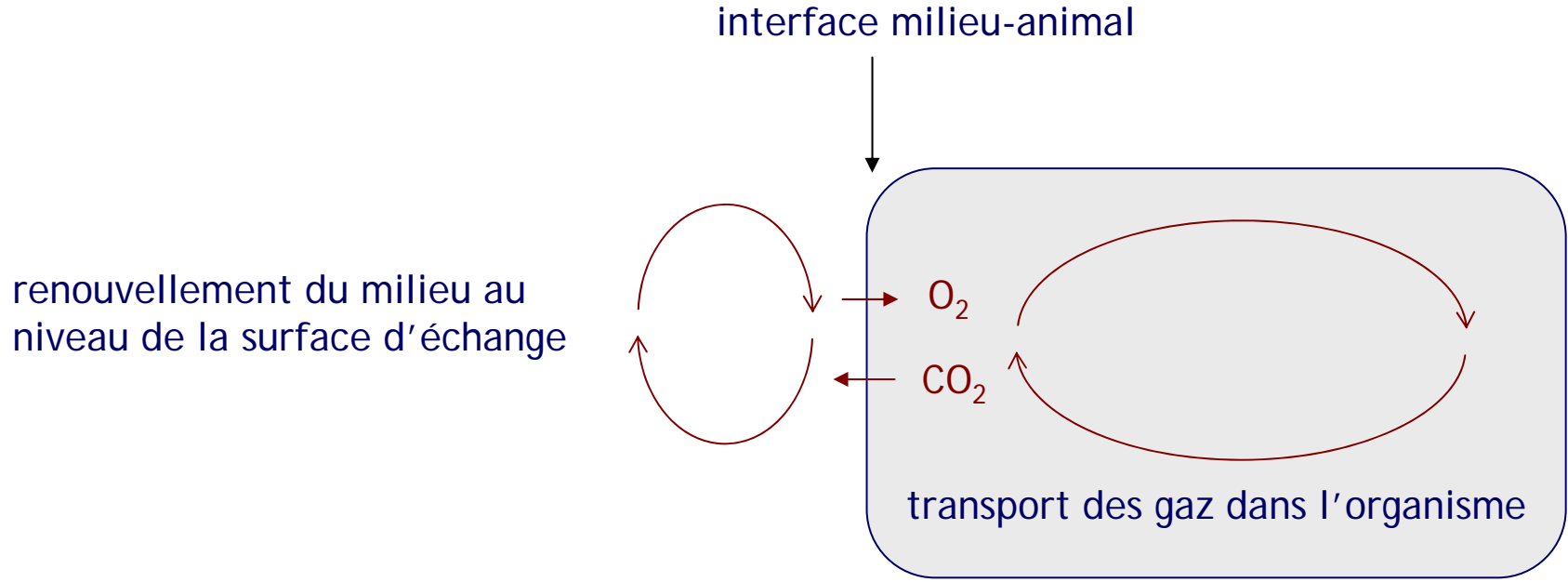
→ *optimiser des coûts*

→ *limiter les agressions microbiennes, physiques, chimiques*

→ *gérer les interférences avec d'autres problèmes :*

thermorégulation, deshydratation, déglutition...

réponses fonctionnelles aux contraintes



transport des gaz dans l'organisme

diffusion

possible uniquement sur des distances très courtes

système trachéal des Insectes

réseau ramifié de trachées et trachéoles qui amènent au milieu des tissus;

diffusion des gaz entre l'extrémité des trachéoles et les tissus

transport des gaz dans l'organisme

transport par la circulation

La circulation sanguine assure le transport des gaz entre la zone d'échange gazeux et les tissus

problème : le dioxygène est très peu soluble dans l'eau

diffusion des gaz entre les capillaires sanguins et les tissus

présence de pigments respiratoires capables de fixer l'O₂
→ augmentent la concentration en O₂

$$[O_2]_{\text{totale}} = [O_2 \text{ dissous}] + [O_2\text{-pigments}]$$

loi de Henry

propriétés du pigment

caractéristiques fonctionnelles

caractéristiques générales

transport des gaz dans l'organisme

répartition phylogénétique
des pigments respiratoires

pigments présents :

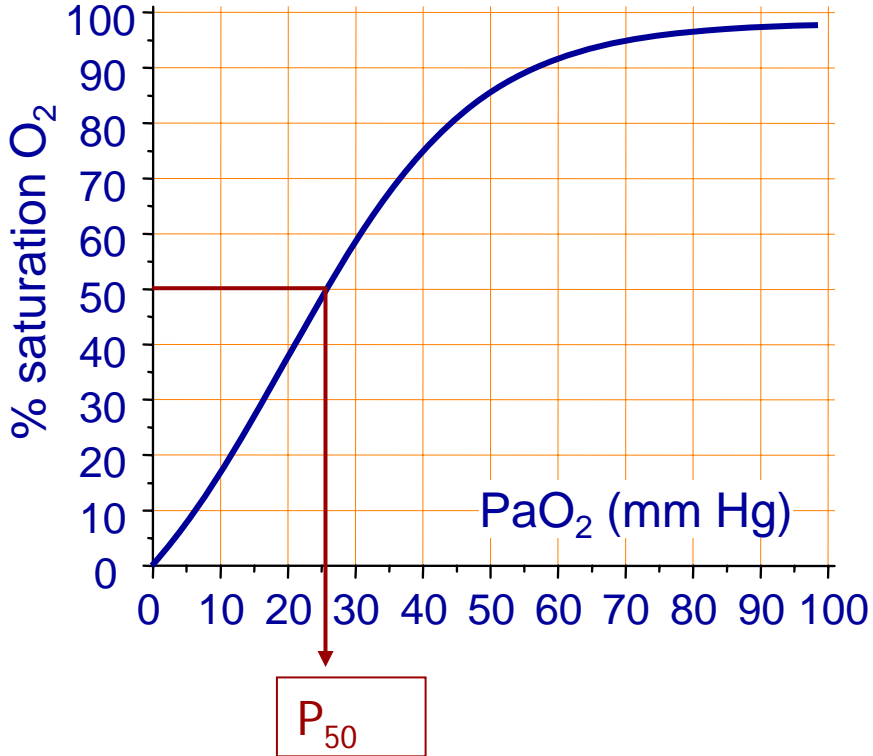
- ➔ en solution dans le plasma
- ➔ dans des cellules spécialisées
érythrocytes

hémoglobine

pigments	
hémoglobine	Échinodermes Plathelminthes Chordés Nématodes Mollusques <i>Chitons</i> <i>Lamellibranches</i> <i>Céphalopodes</i> <i>Opisthobranthes pulmonés</i> Annélides <i>Oligochètes</i> <i>Polychètes</i> Crustacés Insectes
hémérythrine	Brachiopodes Sipunculiens Priapulides Annélides <i>Polychètes</i>
chlorocruorine	Annélides <i>Polychètes</i>
hémocyanine	Céphalopodes Opisthobranthes pulmonés Crustacés Chélicérates

transport des gaz dans l'organisme

hémoglobine :
courbe de dissociation



$$[O_2]_{\text{totale}} = [O_2 \text{ dissous}] + [O_2\text{-pigments}]$$

loi de Henry

propriétés du pigment

contraintes comparées : milieu aquatique et aérien

milieu aquatique

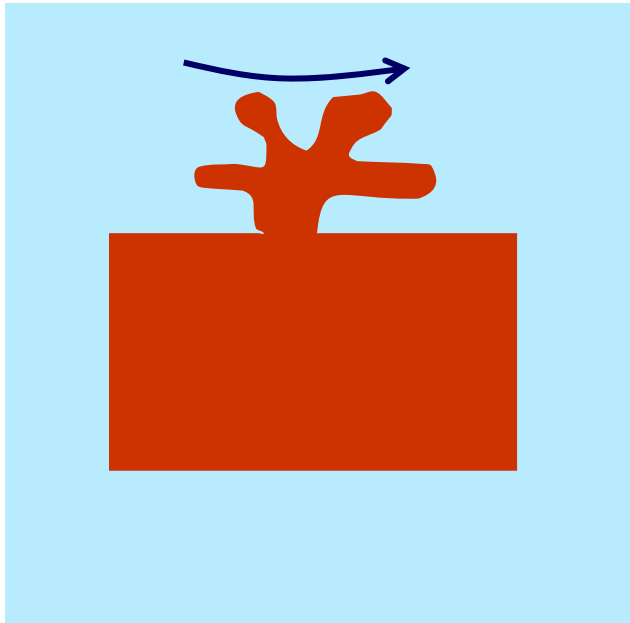
- ◆ O_2 peu abondant
- ◆ mobilisation du milieu extérieur coûteuse
- ◆ pb. associés
 - thermorégulation
 - osmorégulation

milieu aérien

- ◆ O_2 abondant
- ◆ mobilisation du milieu extérieur peu coûteuse
- ◆ pb. associés
 - déshydratation
 - (thermorégulation)

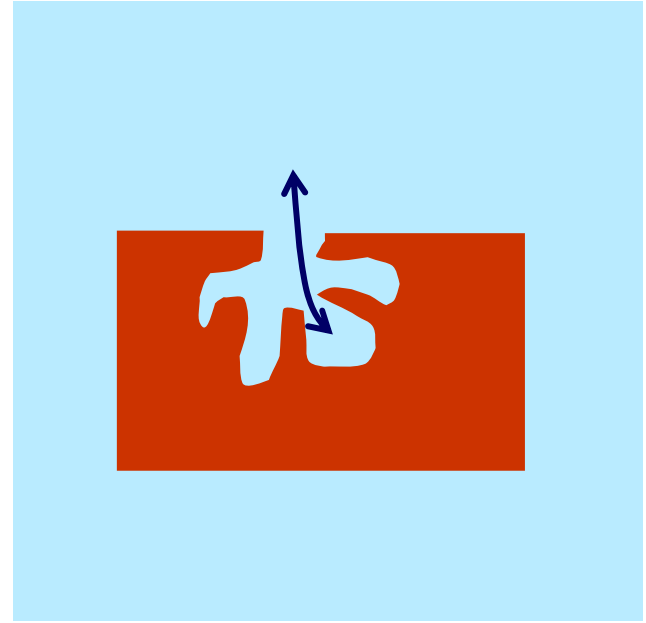
interface milieu-animal

évaginée : branchies



peu de résistance à l'écoulement
→ respiration aquatique
→ flux unidirectionnel

invaginée : poumons

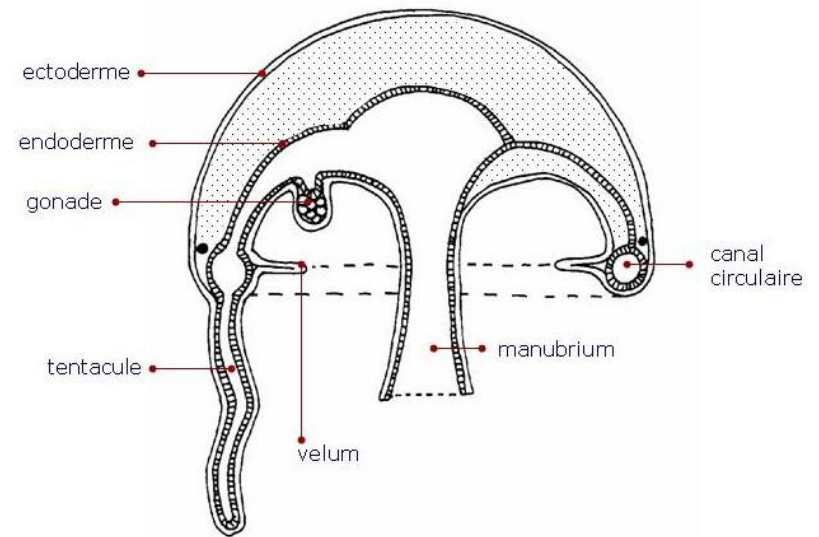
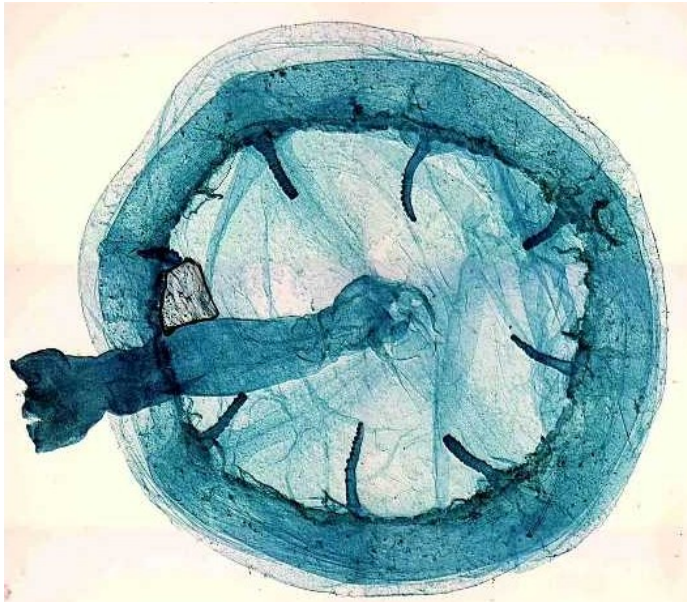


évite la deshydratation
résistance à l'écoulement
→ respiration aérienne
→ flux bidirectionnel

pas d'appareil spécialisé

Cnidaires

◆ diffusion des gaz directement à travers les membranes plasmiques entre le milieu extérieur (l'eau) et le cytoplasme.



Méduses : matière organique < 1% organisme

les types d'appareil respiratoire

respiration aquatique

pas d'appareil spécialisé

Amphibiens non pulmonés

- ◆ le tégument joue le rôle de surface d'échange
- ◆ la distribution dans l'organisme est assurée par la circulation



Amphibiens :

respiration pulmonaire et/ou cutanée
variable selon les espèces
variable selon les saisons
différent pour CO_2 et O_2

Telmatobius culeus

grenouille du lac Titicaca

respiration aquatique cutanée en altitude

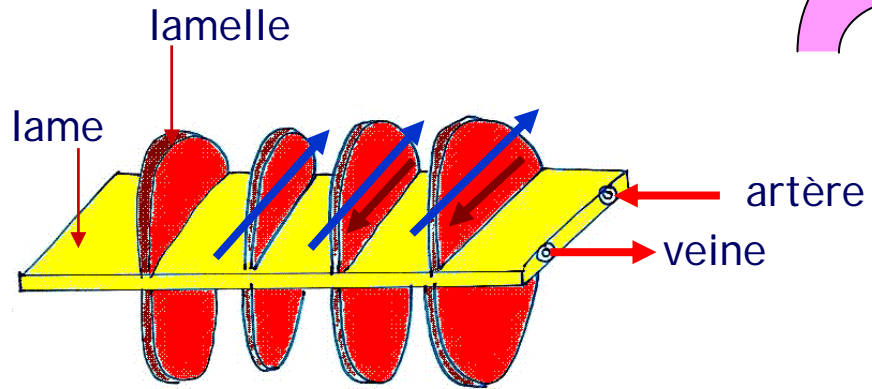
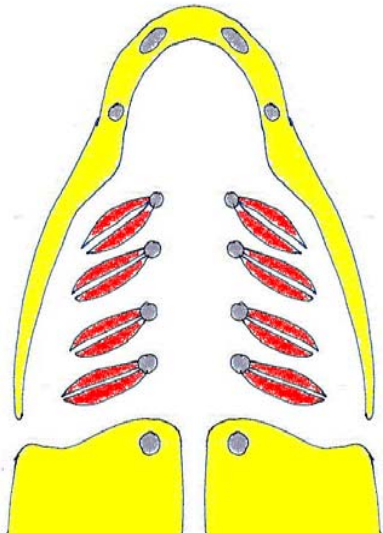
replis cutanés nombreux → augmentation de la surface

les branchies

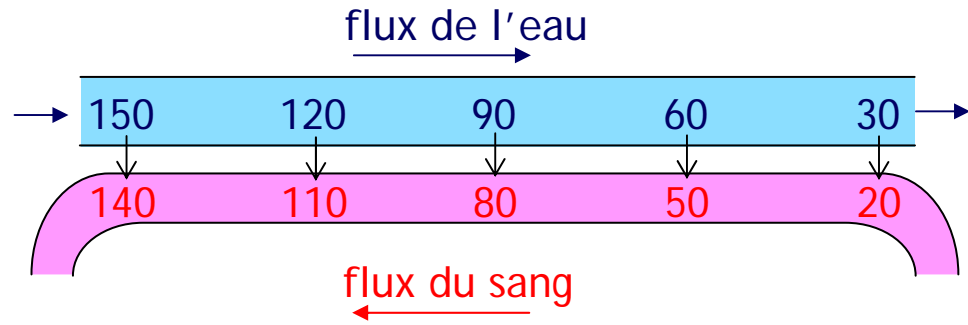
« Poissons »

- ◆ surface d'échange évaginée (éventuellement protégée)
- ◆ système circulatoire assure la distribution dans l'organisme

systeme branchial des poissons Téléostéens



systeme à contre-courant



les branchies

« Poissons »

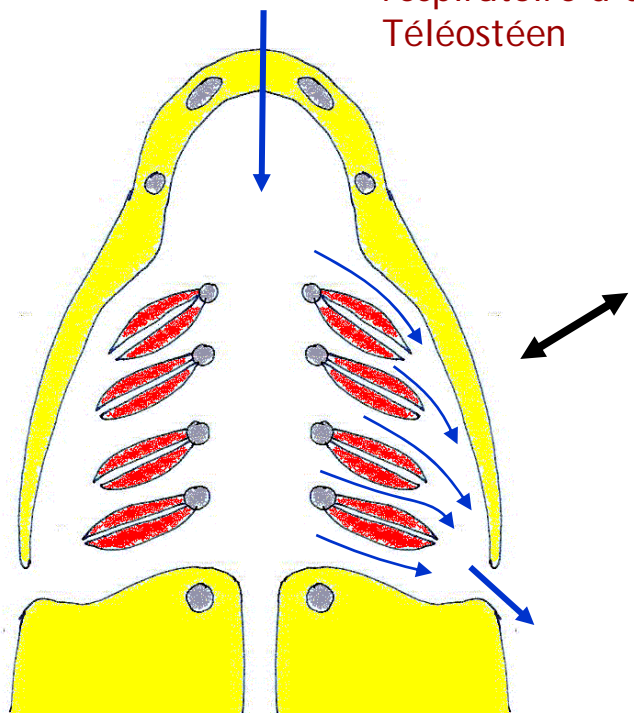
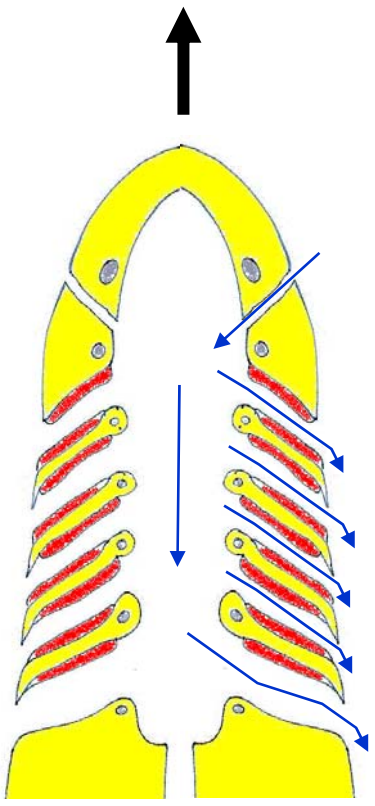
ventilation

A. déplacement de l'animal

B. mécanisme de ventilation

appareil respiratoire d'un Sélacien

appareil respiratoire d'un Téléostéen



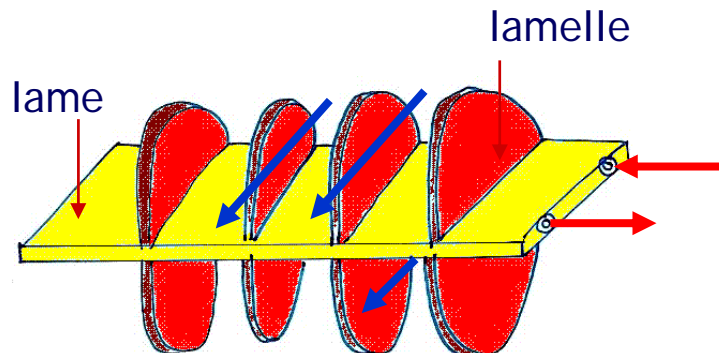
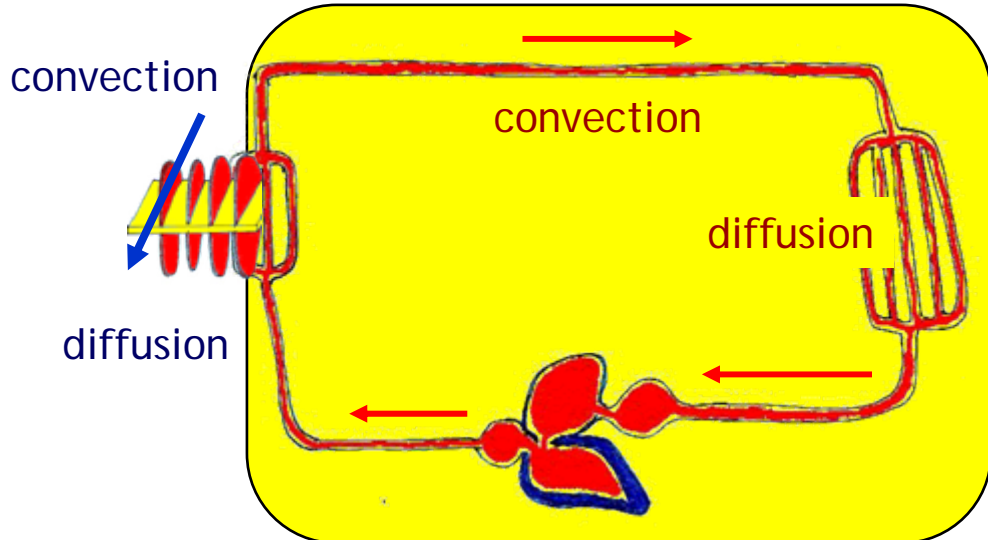
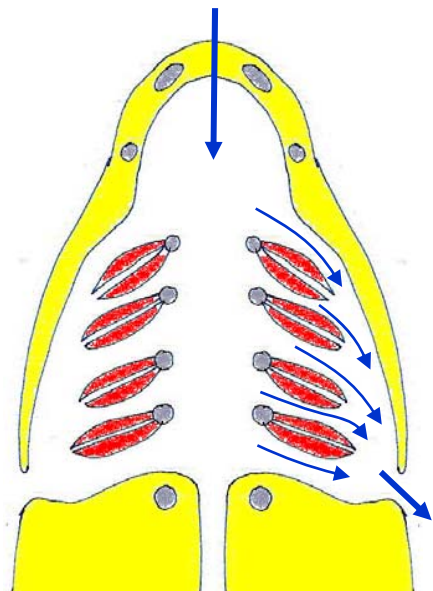
L'animal renouvelle l'eau au niveau des branchies en se déplaçant

L'animal renouvelle l'eau au niveau des branchies par le mouvement des opercules qui crée un courant

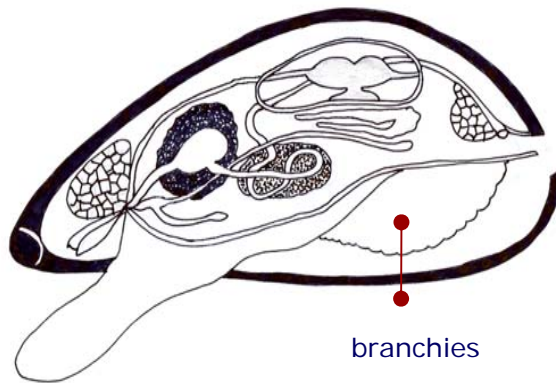
les branchies

« Poissons »

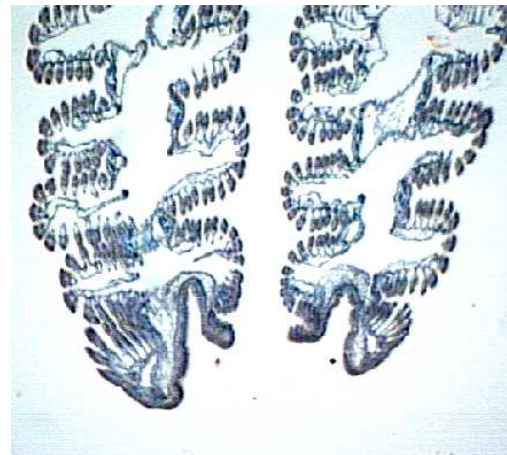
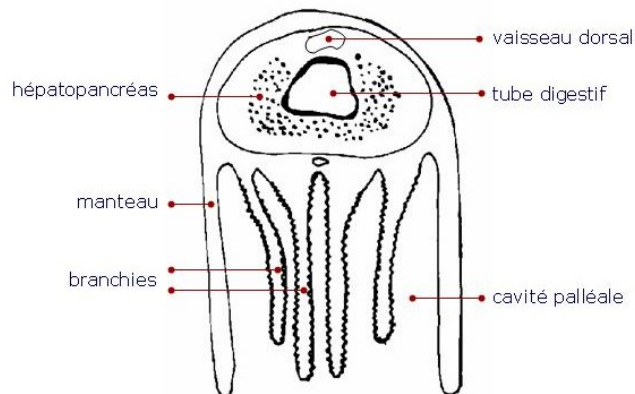
systeme branchial des poissons Téléostéens



système branchial des Lamellibranches



- ◆ branchies : 4 feuillets doubles plissés
- ◆ battements des cils : courant
- ◆ circulation sanguine (ouverte)
- ◆ circulation à contre-courant

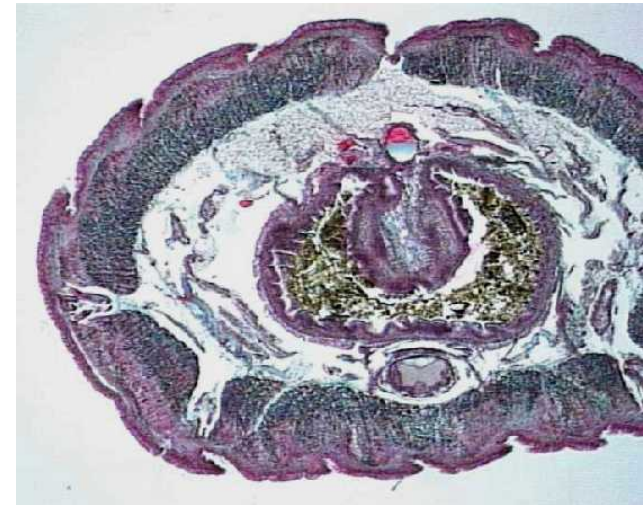
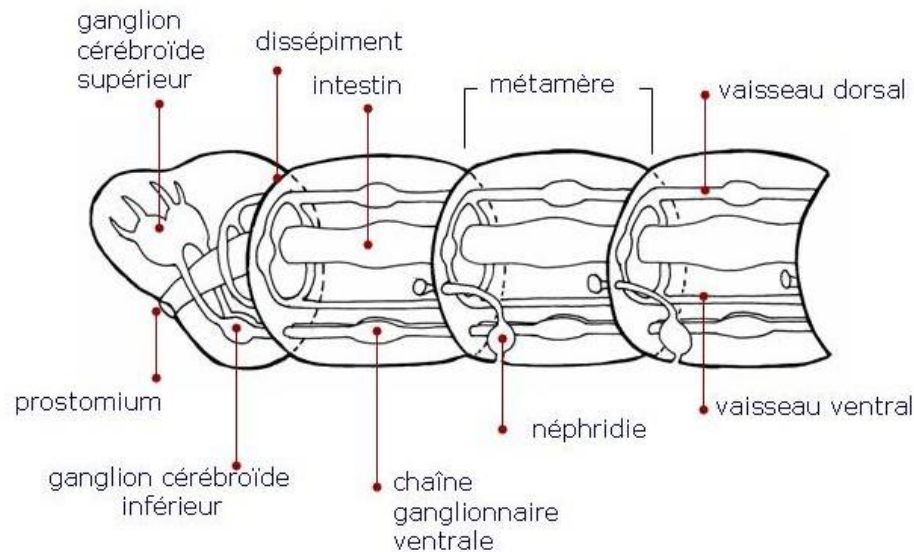


pas d'appareil spécialisé

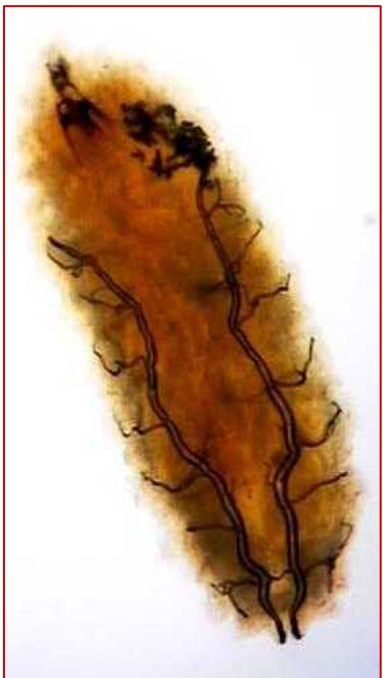
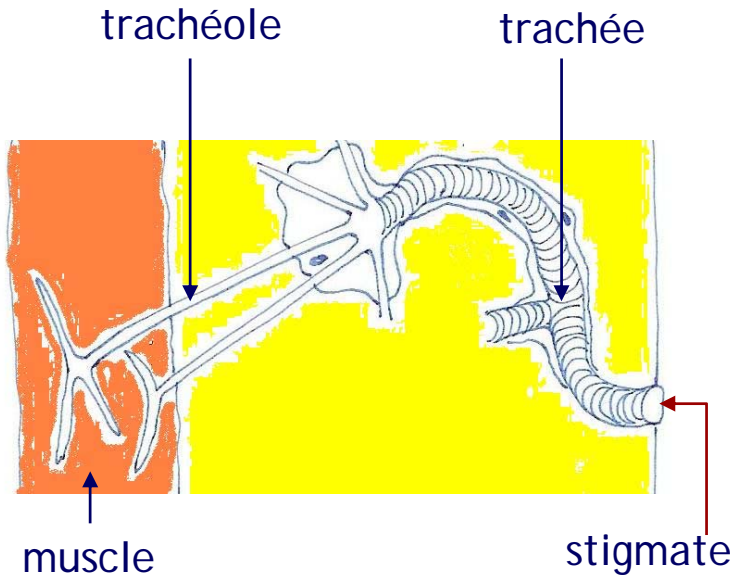
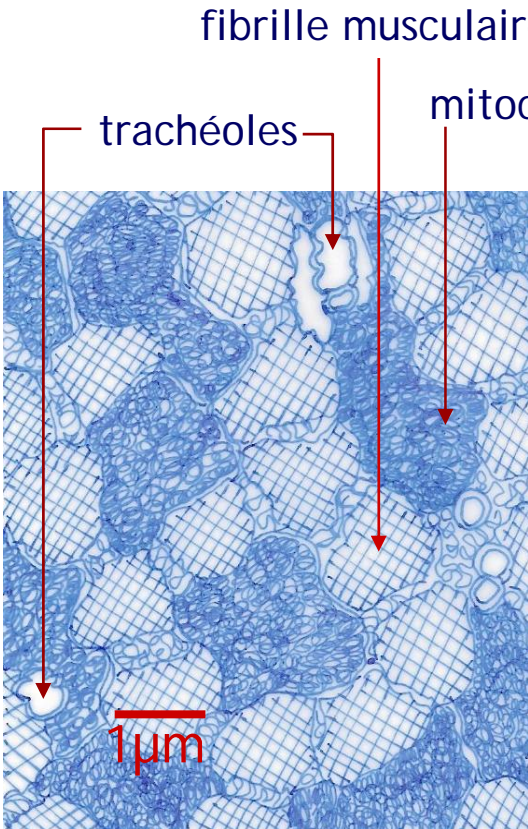
Lombric

Lombric

- ◆ le tégument joue le rôle de surface d'échange
- ◆ la distribution dans l'organisme est assurée par la circulation ouverte



systeme trachéal des Insectes



Pupe de Drosophile

- ◆ le système respiratoire est ramifié jusqu'aux tissus (quelques μm)
- ◆ la zone d'interface est à proximité de la zone de consommation d'O₂

les animaux pulmonés

- ◆ surface d'échange invaginée
- ◆ système circulatoire assure la distribution dans l'organisme

exemples :

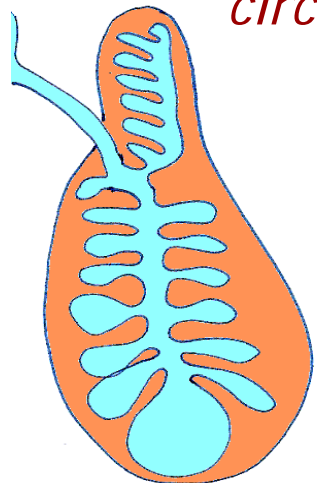
Mollusques terrestres (Escargots)

Arachnides

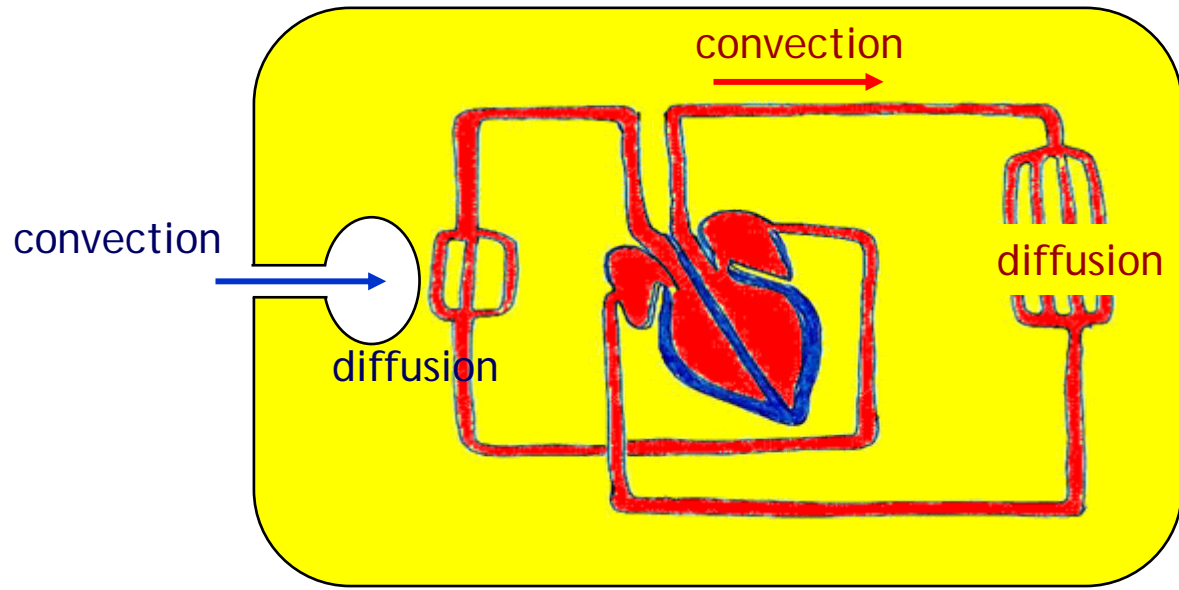
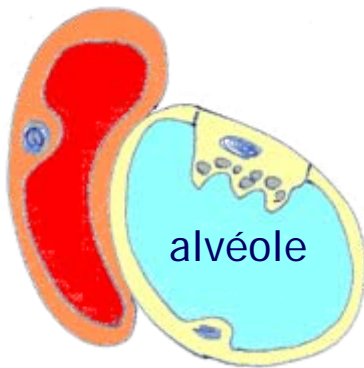
Vertébrés pulmonés

les poumons des Vertébrés

- ◆ surface d'échange invaginée
 - ◆ système circulatoire assure la distribution dans l'organisme
- circulation pulmonaire*
circulation systémique

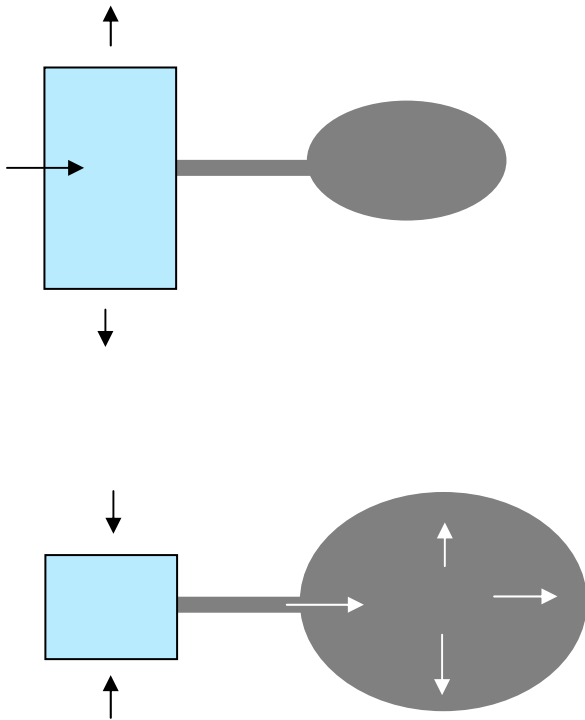


capillaire



les poumons des Vertébrés

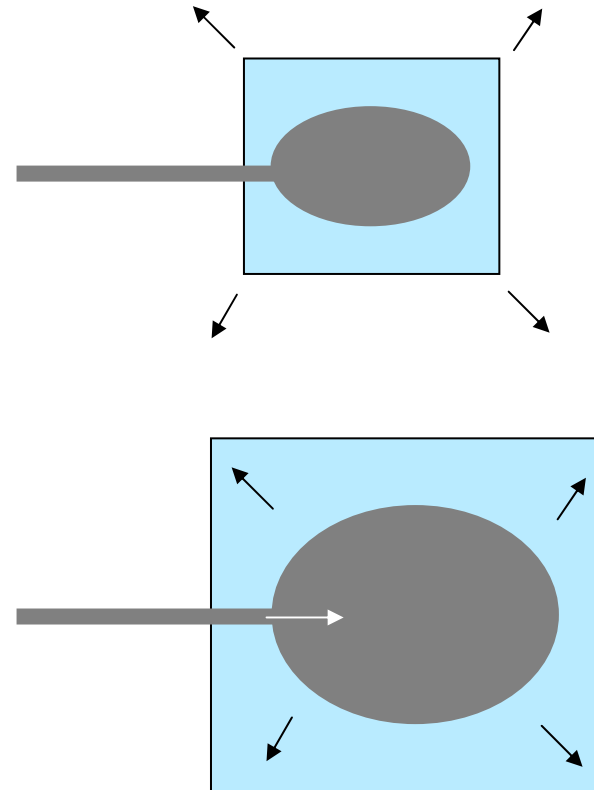
A. pompe refoulante
cavité buccale



poissons à poumon, Batraciens

les systèmes de ventilation

B. pompe aspirante
cavité thoraco-abdominale

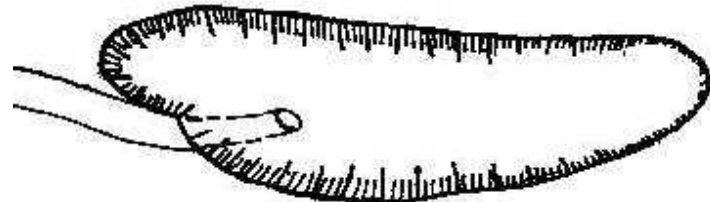


Reptiles, Oiseaux, Mammifères

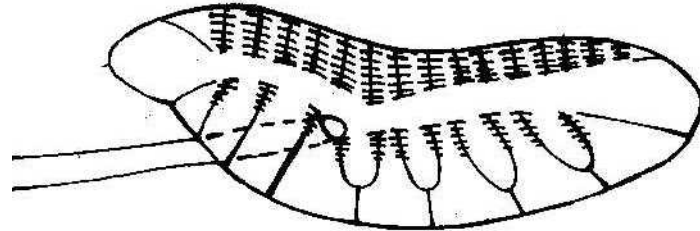
les poumons des Vertébrés

les différents types de poumons

A. poumon sacculaire monocavitaire septé

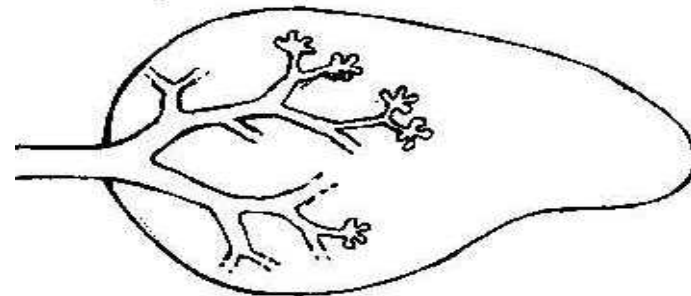


B. poumon sacculaire pluricavitaire septé



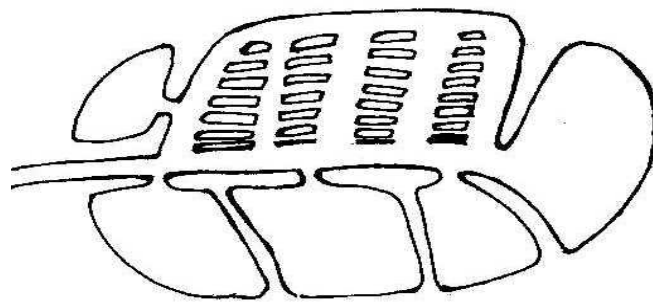
« reptiles »

C. poumon bronchoalvéolaire



Mammifères

D. poumon tubulaire



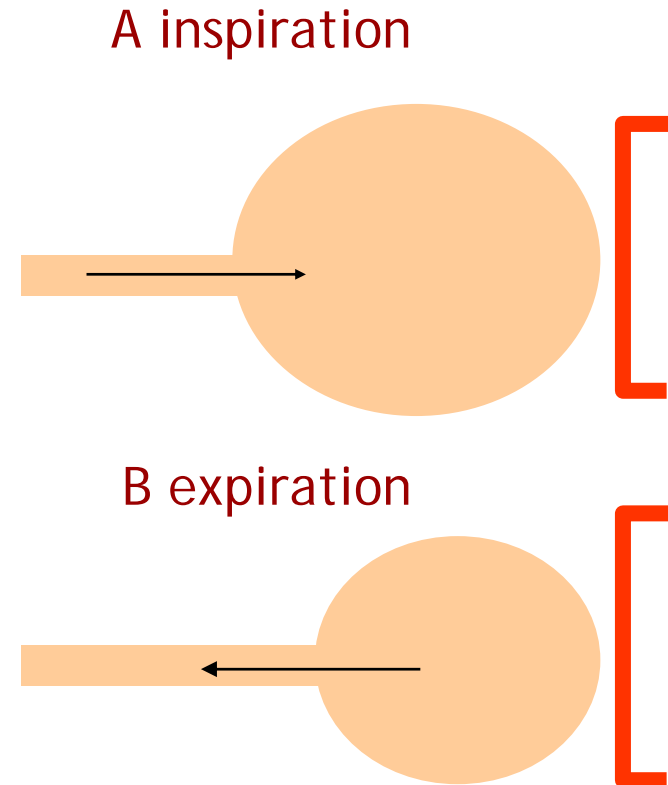
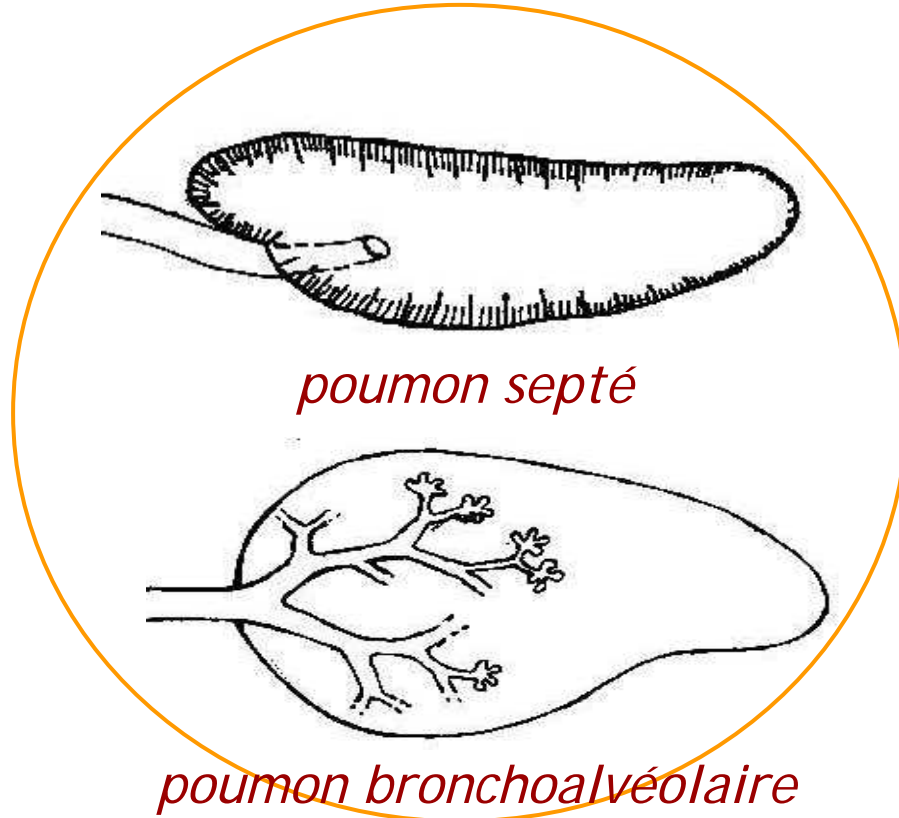
Oiseaux

les poumons des Vertébrés

les systèmes de ventilation

ventilation bidirectionnelle

- ◆ pompe buccale : Poissons, Amphibiens,
- ◆ pompe thoracoabdominale : Reptiles, Mammifères



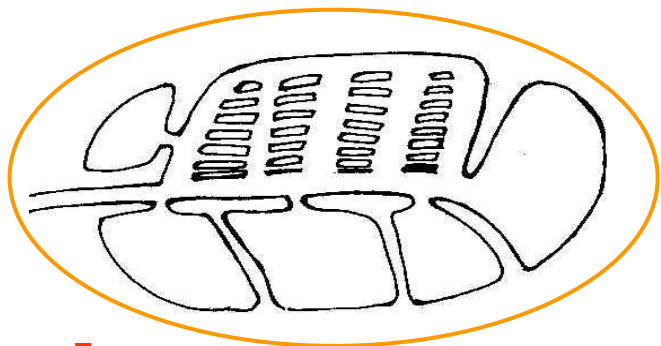
caractéristiques fonctionnelles types de systèmes respiratoires

les poumons des Vertébrés

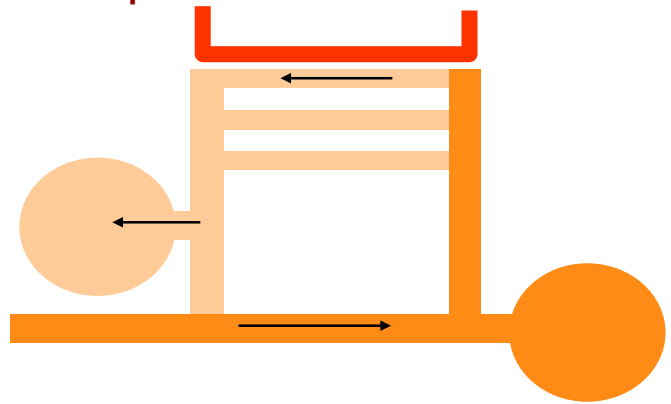
les systèmes de ventilation

la ventilation unidirectionnelle des Oiseaux

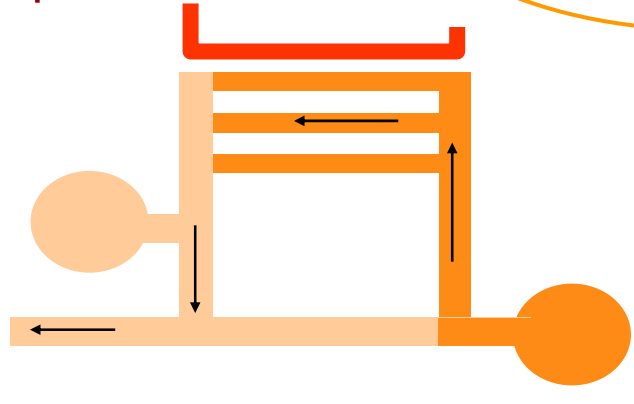
◆ pompe thoracoabdominale



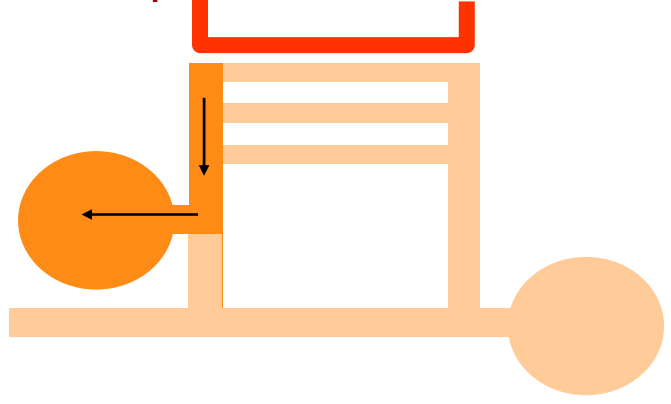
A inspiration



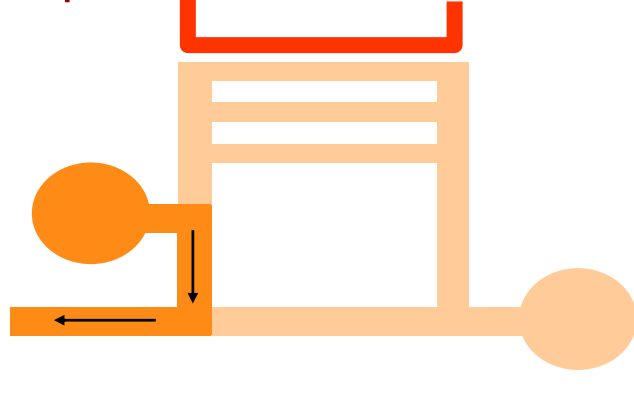
B expiration



C inspiration



D expiration

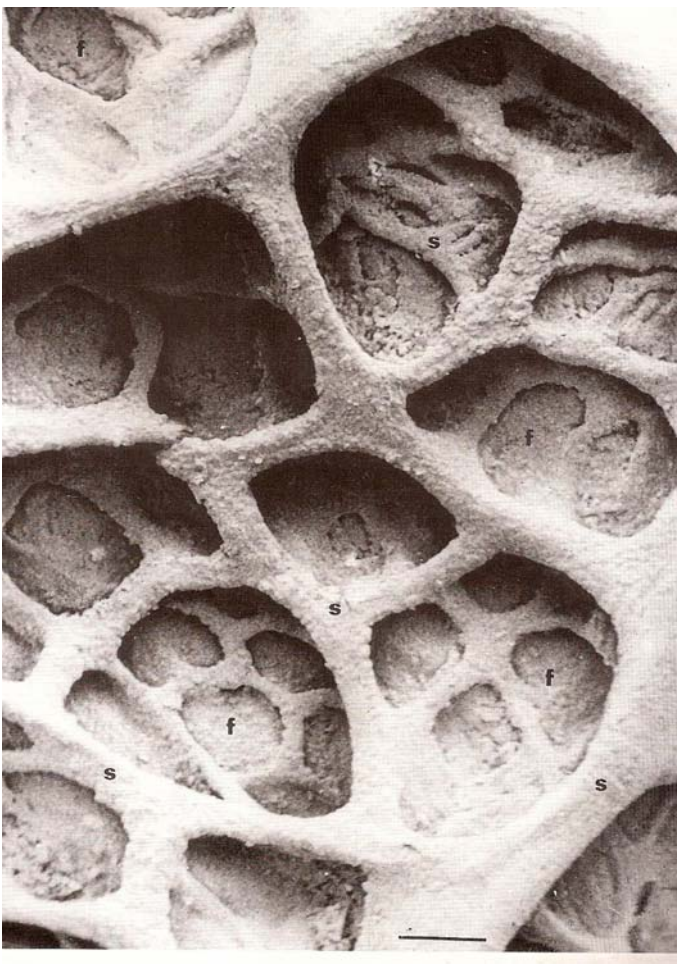


les types d'appareil respiratoire

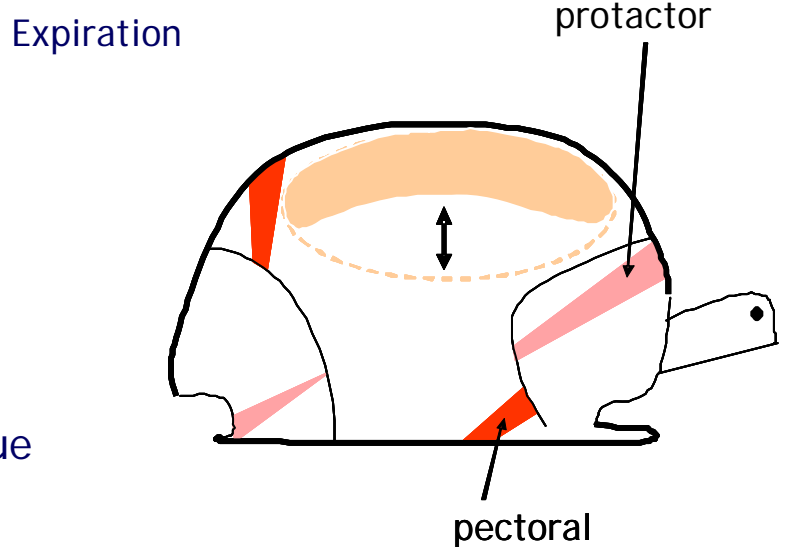
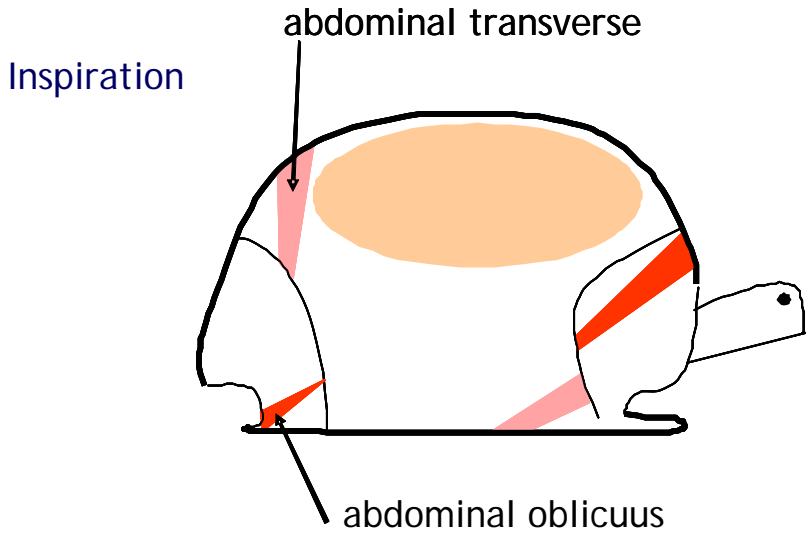
respiration aérienne

les poumons des Vertébrés

Chéloniens



microscopie électronique de poumon de tortue
(from Maina, 2002)

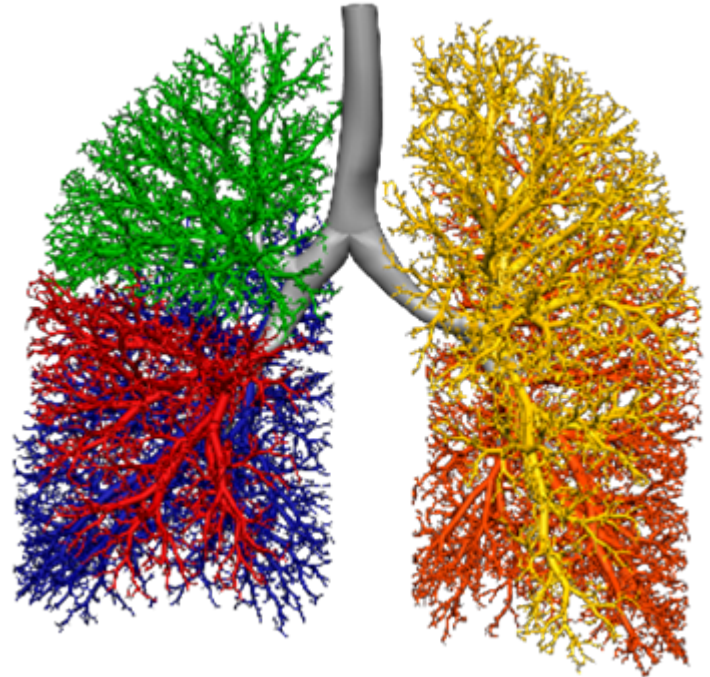


les types d'appareil respiratoire

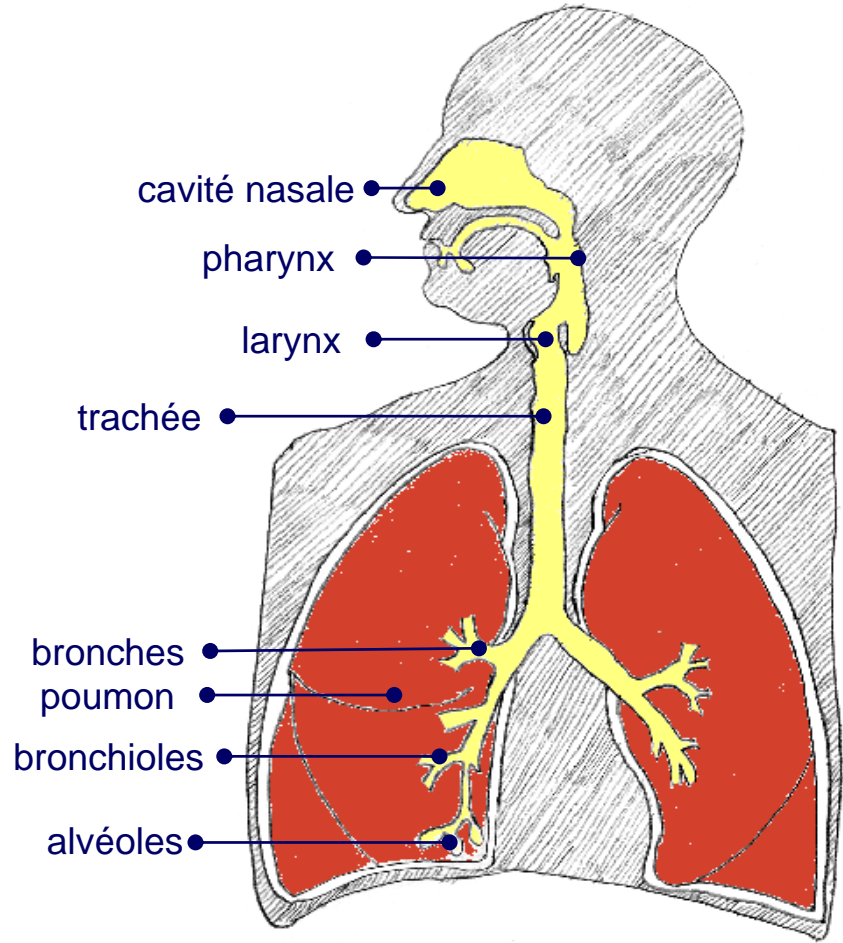
respiration aérienne

les poumons des Vertébrés

Mammifères



◆ zone de convection

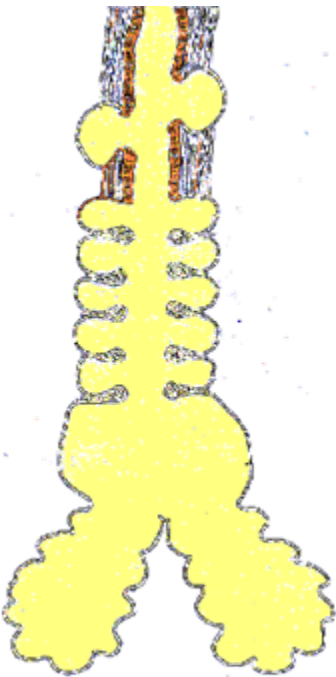


les types d'appareil respiratoire

respiration aérienne

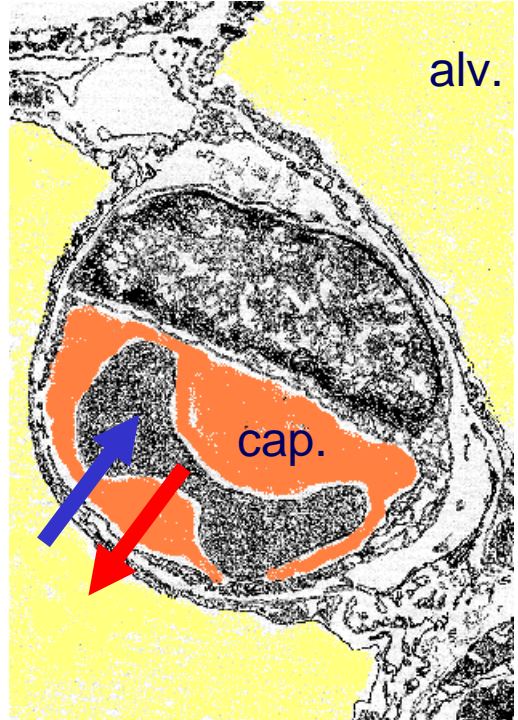
les poumons des Vertébrés

◆ zone d'échange gazeux

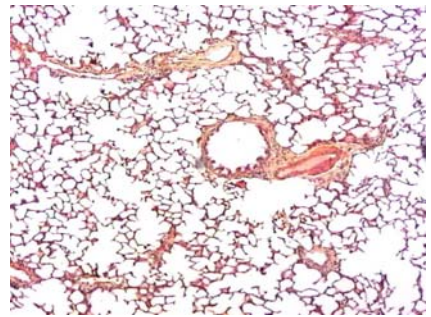


terminaison d'une voie aérienne

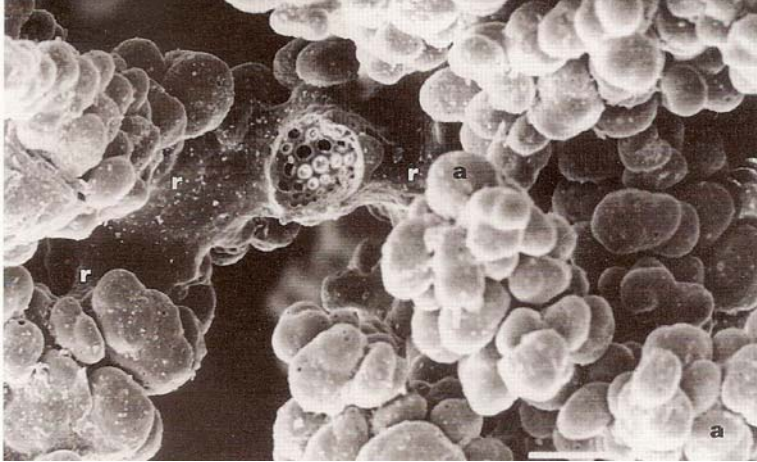
poumon de rat



paroi alvéolo-capillaire



Mammifères



poumon de porc



poumon de chauve-souris

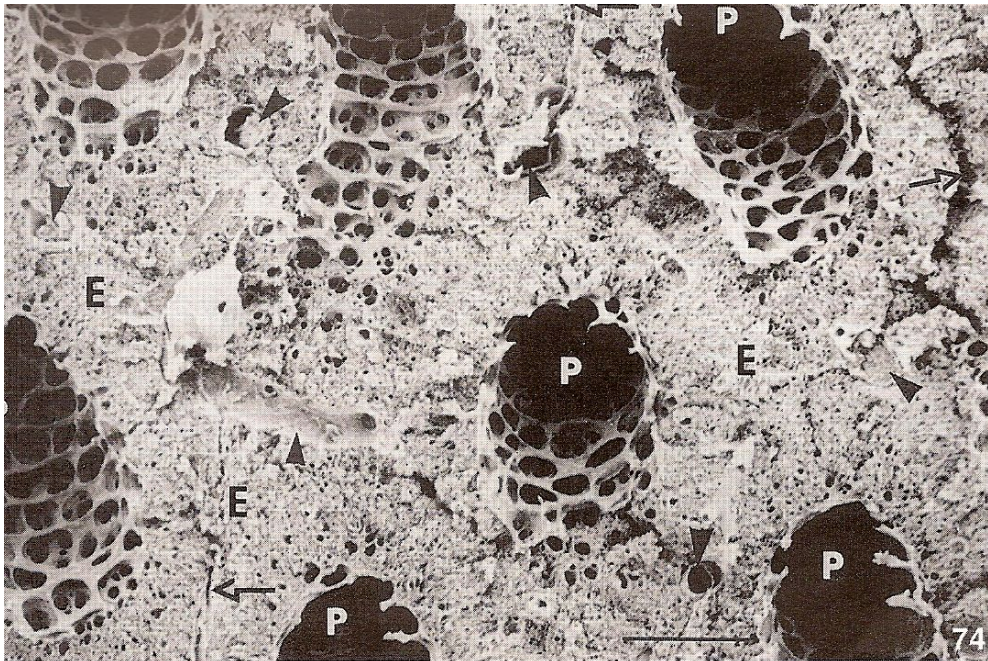
(de Maina, 2002)

les poumons des Vertébrés

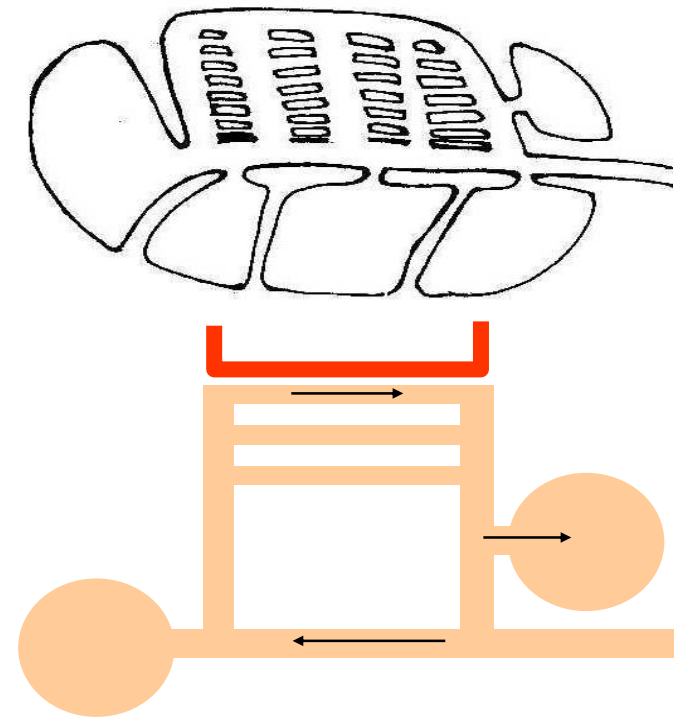
Oiseaux

poumon tubulaire

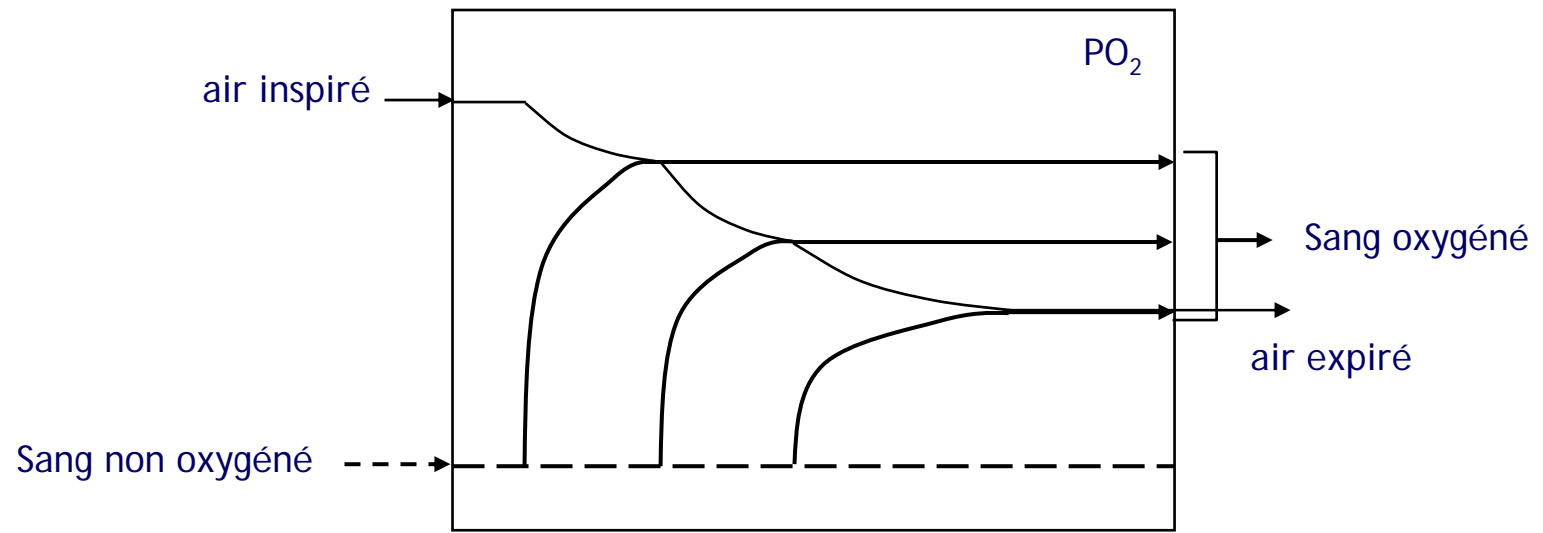
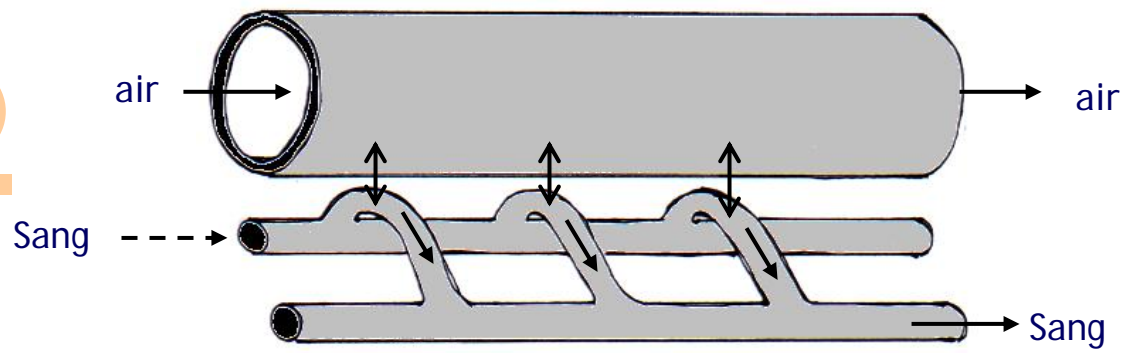
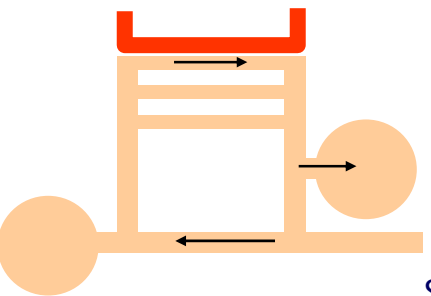
- ◆ sacs aériens : ventilation
- ◆ « capillaires » aériens et parabronches : échanges gazeux



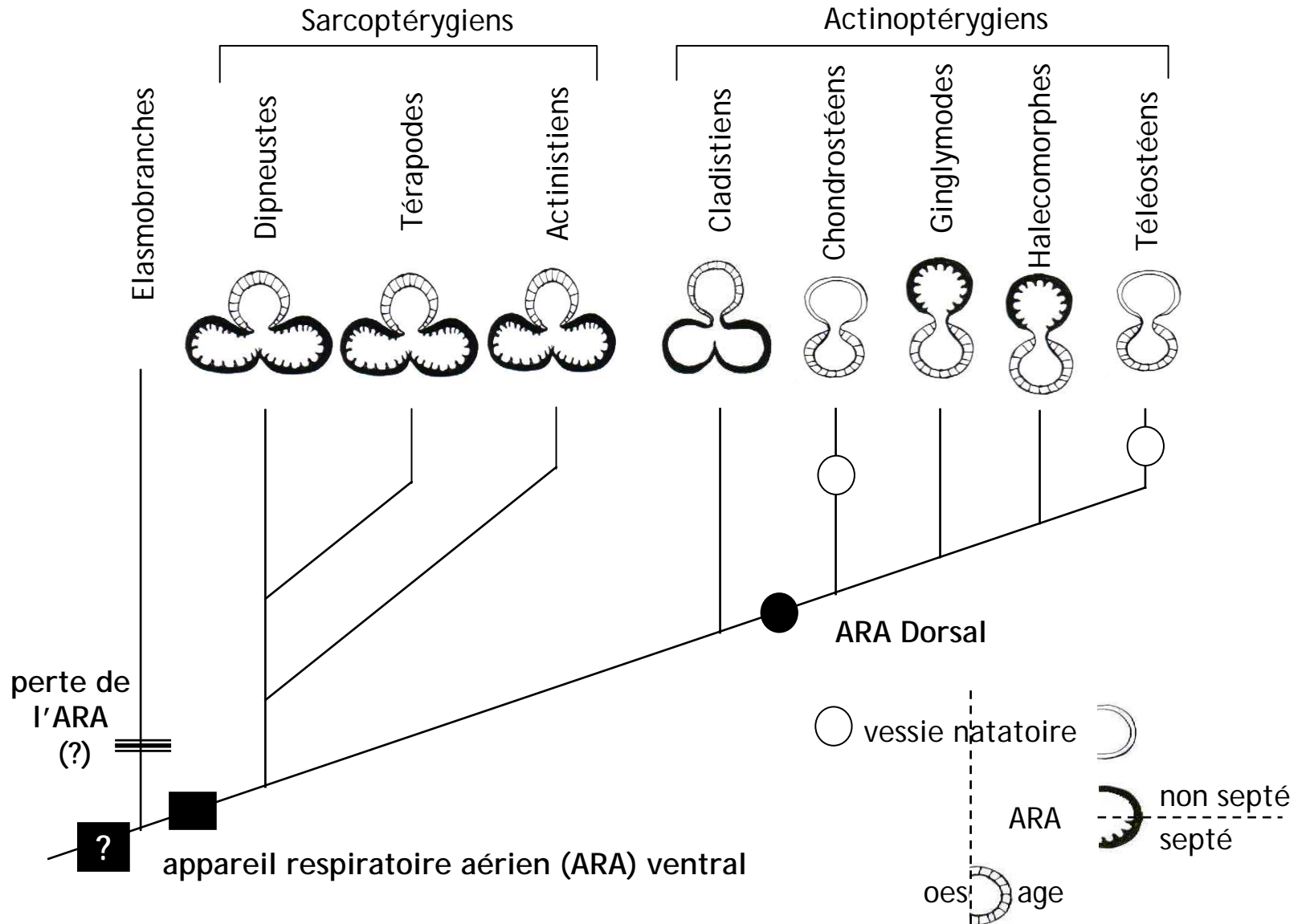
(deMaina, 2002)

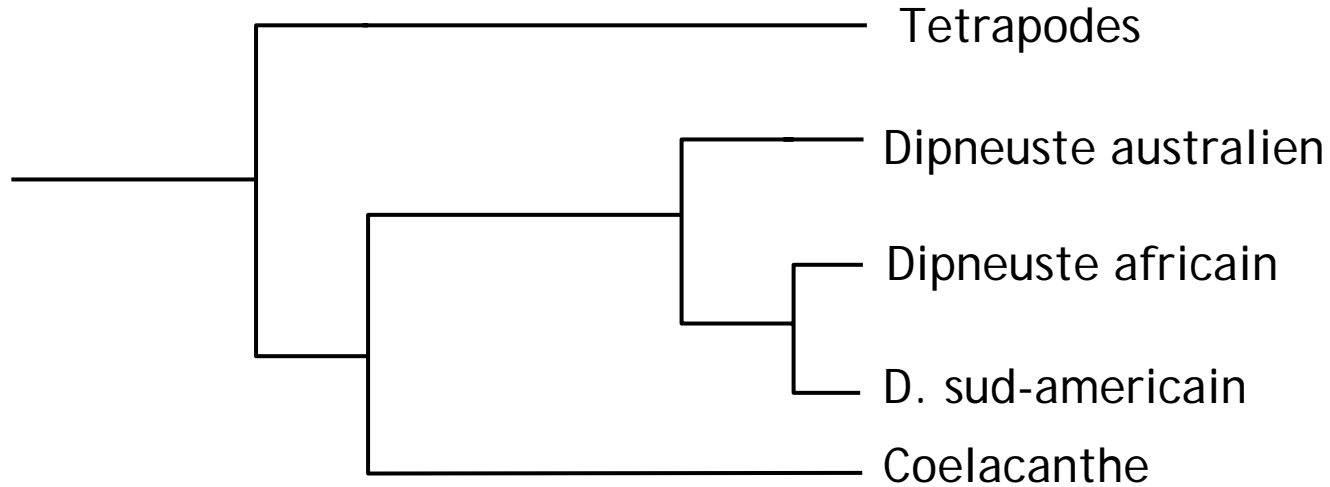


◆ système concourant multiple



cladogramme simplifié des gnathostomes





Dipneustes actuels : les organismes vivants les plus proches des Tétrapodes avec un ARA fonctionnel

3 genres :

Protopterus (4 espèces) Afrique

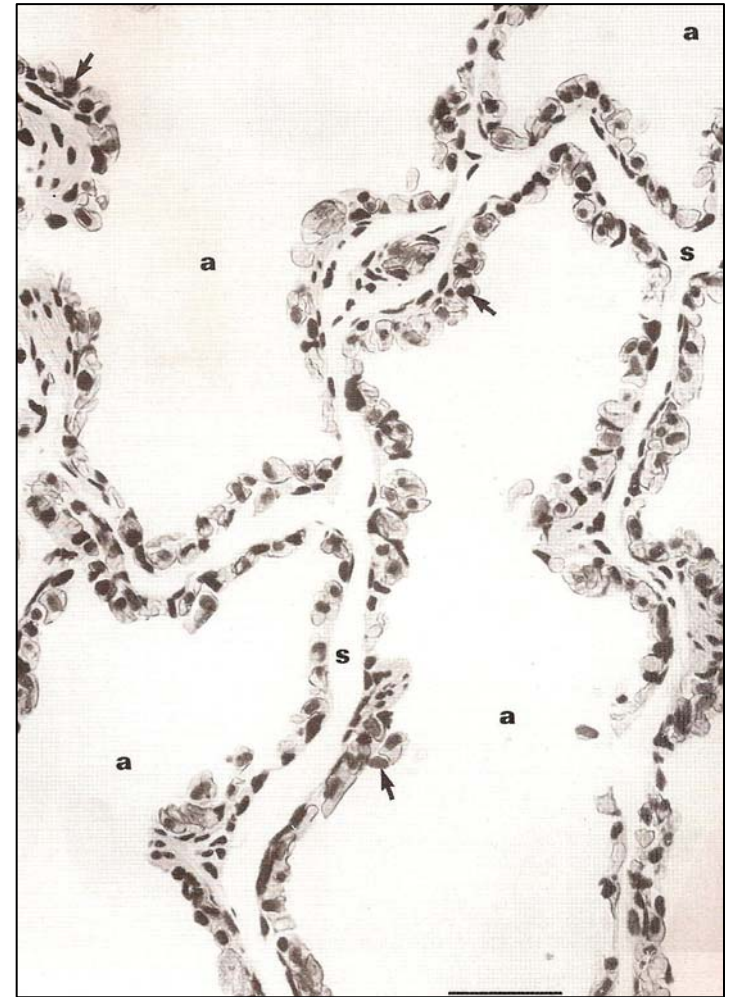
Lepidosiren (1 espèce) Amérique du sud

Neoceratodus (1 espèce) Australia





poumon de *Protopterus* (m. e.)



poumon de *Protopterus* (histologie)

(de Maina, 2002)

le poumon des Amphibiens primitifs

Ancêtres des Tétrapodes : Panderichthyés (sarcopterygiens éteints)

Dévonien (370-390 Ma: apparition de Tétrapodes aquatiques
respiration bimodale : branchie/poumon
fraction O₂ faible (15 %)

Carbonifère (360-320 Ma : apparition de Tétrapodes terrestres
passage d'une respiration bimodale à monomodale
forte fraction O₂ (35%); fraction de CO₂ (0,003%)

structure putative du poumon des Tétrapodes primitifs:
poumon monocavitaire septé

origine du poumon des Tétrapodes

Tétrapodes actuels

