

**L'organisme,
un système
en interaction
avec son
environnement**

Capacités exigibles

- ▼ Argumenter à partir d'un nombre réduit d'exemples (mammifère, poisson téléostéen, crustacé, insecte) et des observations faites en travaux pratiques
- ▼ Mettre en évidence les échangeurs respiratoires sur différents supports (dissections, coupes histologiques...) issus de différents modèles animaux (souris, poisson téléostéen, crustacé, insecte, moule, planaire, arénicole ou néréis)
- ▼ Montrer que les échanges respiratoires reposent sur la diffusion des gaz suivant la loi de Fick
- ▼ Relier les dispositifs observés aux différentes échelles :
 - aux contraintes fonctionnelles (diffusion - loi de Fick)
 - aux contraintes du milieu de vie (densité, viscosité, richesse en eau, richesse en dioxygène)
- ▼ Identifier et énoncer des convergences anatomiques ou fonctionnelles
- ▼ Analyser la convection externe sur deux exemples : un téléostéen pour la convection externe en milieu aquatique et un mammifère pour la ventilation pulmonaire
- ▼ Expliquer l'optimisation des gradients de pression partielle sur un exemple d'échange à contre-courant
- ▼ Relier les conditions locales de la fixation et du relargage du dioxygène aux propriétés de l'hémoglobine et au fonctionnement de l'hématie.
L'hémoglobine humaine de l'adulte sera le seul exemple abordé

Exemple d'une fonction en interaction directe avec l'environnement :

la respiration

Introduction

- Les animaux comblent leurs besoins en énergie, nécessaire au fonctionnement et à l'entretien de leur organisme, par l'**oxydation respiratoire de la matière organique**. Cette respiration cellulaire productrice d'ATP nécessite un **apport constant de dioxygène**, accepteur final des électrons de la chaîne respiratoire, et l'**élimination continue du déchet dioxyde de carbone** issu des décarboxylations oxydatives survenues dans la matrice mitochondriale.
- Alors qu'il existe des systèmes de stockage des nutriments énergétiques (glycogène, triglycérides), il n'existe pas de système de mise en réserve prolongée de dioxygène. L'accessibilité permanente au dioxygène est donc une priorité pour la plupart des cellules animales.
- Les **surfaces d'échanges respiratoires** assurent le prélèvement de dioxygène et l'évacuation du dioxyde de carbone vers l'environnement. L'accessibilité aux gaz n'est pas la même dans les milieux aquatique et aérien. De surcroît, les échanges de gaz sont associés à des échanges d'eau qui peuvent poser problème, particulièrement en milieu aérien.
- De nombreux animaux ont des surfaces d'échanges respiratoires spécialisées et adaptées aux contraintes physico-chimiques de leur milieu de vie. Elles sont associées à un fluide circulant interne, qui assure le transfert des gaz respiratoires entre ces surfaces d'échanges et les tissus.



Quel est le mécanisme d'échange des gaz respiratoires ? Quelles sont les caractéristiques des surfaces d'échanges respiratoires qui optimisent les échanges gazeux tout en répondant aux contraintes particulières des différents milieux de vie ? Comment sont contrôlés les échanges au niveau de ces surfaces ?

1. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES ÉCHANGES GAZEUX RESPIRATOIRES

1.1. DES ÉCHANGES GAZEUX PAR DIFFUSION

Les gaz **diffusent** aisément dans les milieux biologiques, qui sont des compartiments aqueux limités par des bicouches lipidiques. Les surfaces traversées sont les épithéliums respiratoires ou tégumentaires, les membranes plasmiques ou mitochondriales. Les gaz diffusent toujours sous **forme dissoute** au niveau des surfaces d'échanges.

La diffusion suit la **loi de Fick** dont l'écriture, ci-dessous, a été adaptée à la situation d'échange des gaz respiratoires ; sous cette forme, le flux est exprimé en fonction de la **différence de pression partielle**, plus facile à déterminer que des concentrations, dans des expériences de physiologie :

$$F = K.(S/e).|P_2 - P_1|$$

F : flux net de diffusion (mol.s^{-1})

K : constante de diffusibilité ou constante de Krogh dépendante du gaz respiratoire et du milieu concerné ($\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$)

S : surface traversée (m^2)

e : épaisseur traversée (m)

$P_2 - P_1$ ou ΔP : différence de pression partielle du gaz entre les deux compartiments considérés (Pa)

L'optimisation des échanges par diffusion implique donc une **grande surface**, une **faible épaisseur** et le **maintien du gradient de pression partielle** par renouvellement des milieux échangeant les gaz de part et d'autre de la surface d'échanges. Si l'épaisseur e d'un échangeur est constante pour un organisme donné, une modulation des échanges est possible *via* une augmentation de la surface S dans certains cas, et principalement *via* les variations de la différence de pression partielle $|P_2 - P_1|$.

► *Même chap. (5.1) : ouverture de sphincters locaux au niveau des lamelles branchiales*

1.2. LOCALISATION DES ÉCHANGES GAZEUX ENTRE LES CELLULES CONSOMMATRICES ET LE MILIEU EXTÉRIEUR

1.2.1. Échanges directs entre les cellules et le milieu extérieur

La **relation de Harvey** (1928) quantifie de façon théorique la **limite de diffusion du dioxygène** depuis la surface vers le centre d'un hypothétique organisme sphérique, qui consommerait le dioxygène à vitesse constante (**figure 1.1**) :

$$r = \sqrt{(6KP_{O_2}/A)}$$

r : rayon de la sphère (m)

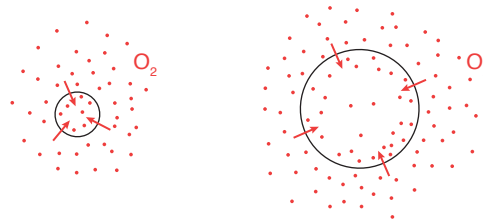
K : constante de Krogh ($\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$)

P_{O_2} : pression partielle de O_2 à la surface de la sphère (Pa)

A : taux de consommation de O_2 ($\text{mol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$)

Figure 1.1

Diffusion du dioxygène
au sein de deux
organismes
sphériques
hypothétiques
de tailles différentes



Chez un organisme de grande taille, la diffusion ne permet pas l'oxygénation des parties éloignées de la surface.

L'application numérique de la relation de Harvey montre que le **rayon** de l'organisme sphérique **ne peut excéder une valeur de l'ordre du millimètre** pour permettre l'approvisionnement suffisant en dioxygène. En effet, en cas d'augmentation du rayon, la surface de l'animal augmente en r^2 tandis que les besoins (A) augmentent en proportion du volume, donc en r^3 . En conséquence, seuls les unicellulaires et les organismes de taille très réduite peuvent assurer l'approvisionnement de leurs cellules par échanges directs et simple diffusion depuis la surface du corps.

Néanmoins, les animaux ne sont pas sphériques et différentes adaptations structurales permettent à des animaux de plus grande taille d'assurer dans certains cas des échanges directs suffisants entre les cellules et le milieu extérieur. Ainsi la forme des vers plats, comme la planaire, ou les expansions des parapodes de la néréis, assurent un accroissement important de leur rapport surface/volume; les cnidaires ont, quant à eux, un corps formé de seulement deux couches de cellules, l'une à l'extérieur, l'autre tapissant la cavité digestive dans laquelle l'eau est renouvelée régulièrement.

➤ TP 1.1: respiration
chez la planaire

➤ TP 1.2: respiration
chez la néréis

1.2.2. Échanges par l'intermédiaire d'un système circulatoire

Dans la majorité des cas, les cellules se trouvent à plus d'un millimètre de la surface limitante du corps, les échanges directs ne sont donc plus possibles. Il existe alors un **appareil circulatoire** qui assure les transferts des gaz respiratoires des cellules à la surface d'échanges respiratoires (figure 1.2). Les gaz sont ainsi transportés en masse par un fluide porteur mis en mouvement par la pompe cardiaque, c'est un **transport par convection**.

La surface d'échanges entre l'organisme et l'environnement peut être le tégument ou une surface spécialisée, dont différents exemples sont étudiés dans ce chapitre.

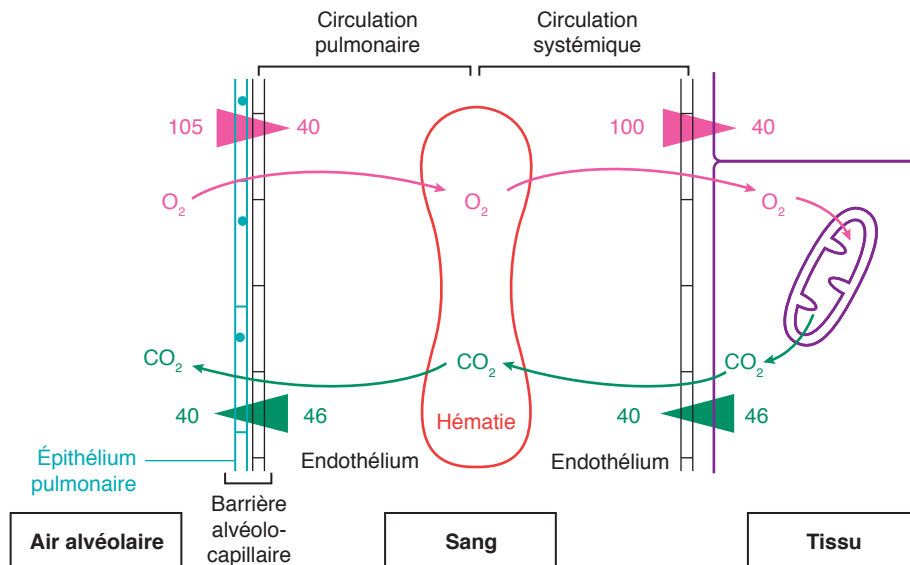
L'appareil circulatoire est soit **ouvert**, comme chez les crustacés dont le liquide circulant est de l'**hémolymphe**, soit **fermé**, comme chez les vertébrés dont le liquide circulant est le **sang**.

➤ Même chap. (2.1)

➤ Même chap. (3.2):
modalités
de convection interne

Figure 1.2

Localisation des échanges gazeux respiratoires et place du sang dans le transport, exemple d'un mammifère



Les pressions partielles en dioxygène et dioxyde de carbone sont indiquées en mmHg

Les échanges de gaz respiratoires s'effectuent au niveau de deux surfaces d'échanges pour lesquelles les distances à franchir sont minimales :

- la surface respiratoire pulmonaire. La barrière alvéolo-capillaire est extrêmement fine (0,2 à 0,6 μm) et vaste : la surface totale de l'interface entre le gaz alvéolaire et le sang capillaire pulmonaire est d'environ 90 m^2 chez l'homme. Le petit volume sanguin (70 à 150 mL) contenu dans les capillaires pulmonaires y circule à faible vitesse (0,1 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$);
- la surface des capillaires présents au niveau des tissus consommateurs (50 m^2). La paroi des capillaires sanguins est limitée par un endothélium d'une seule couche cellulaire (0,3 μm). La distance entre la lumière du capillaire et les cellules des tissus est ainsi très réduite, moins de 50 μm .

1.3. CONDITIONS PHYSICO-CHIMIQUES DES ÉCHANGES GAZEUX RESPIRATOIRES SELON LES MILIEUX DE VIE

Les tableaux 1.1 et 1.2 comparent quelques propriétés de l'eau et de l'air.

Tableau 1.1

Quelques propriétés de l'air et de l'eau

	Air	Eau
Densité	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1
Viscosité dynamique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	$18,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}
Coefficient de capacitance, β ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)	β_{O_2}	$4,1 \cdot 10^{-7}$
	β_{CO_2}	$3,9 \cdot 10^{-7}$
Constante de diffusibilité, K (constante de Krogh, $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)	K_{O_2}	$0,3 \cdot 10^{-13}$
	K_{CO_2}	$7,1 \cdot 10^{-13}$

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. La viscosité dynamique caractérise la résistance à l'écoulement au sein d'une masse de matière.

Tableau 1.2

Volumes en gaz dissous de l'air et de l'eau

	Volume dans 1 L d'air atmosphérique	Volume dissous dans 1 L d'eau (eau distillée à 15°C équilibrée avec l'air atmosphérique)	Rapport air/eau
N ₂	780,9 mL	13,2 mL	
O ₂	209,5 mL	7,2 mL	29,1
CO ₂	0,3 mL	0,3 mL	1
Gaz rares	9,3 mL	-	

► BCPST 1^{re} année
– chap. 10 (2.1) :
caractéristiques
des milieux de vie

1.3.1. Des disponibilités différentes en gaz

La capacitance du dioxygène est plus faible dans l'eau que dans l'air : sous une même pression, la concentration du dioxygène est plus faible dans l'eau (environ 1/30) que dans l'air. La capacitance du dioxyde de carbone est identique à celle du dioxygène dans l'air, en revanche, elle est beaucoup plus élevée dans l'eau : le dioxyde de carbone est beaucoup plus soluble dans l'eau que le dioxygène.

D'autre part, les constantes de Krogh du dioxygène et du dioxyde de carbone montrent que **les gaz diffusent beaucoup mieux dans l'air que dans l'eau.**

En résumé, le milieu aqueux se caractérise par :

- une **forte capacité d'absorption du dioxyde de carbone** et donc une élimination aisée pour les animaux aquatiques ;
- une **faible disponibilité du dioxygène** : il faut brasser 30 fois plus de fluide que dans l'air pour se procurer la même quantité de dioxygène.

Le milieu aérien, par opposition, se caractérise par une **grande disponibilité en dioxygène.**

1.3.2. Des contraintes physiques différentes

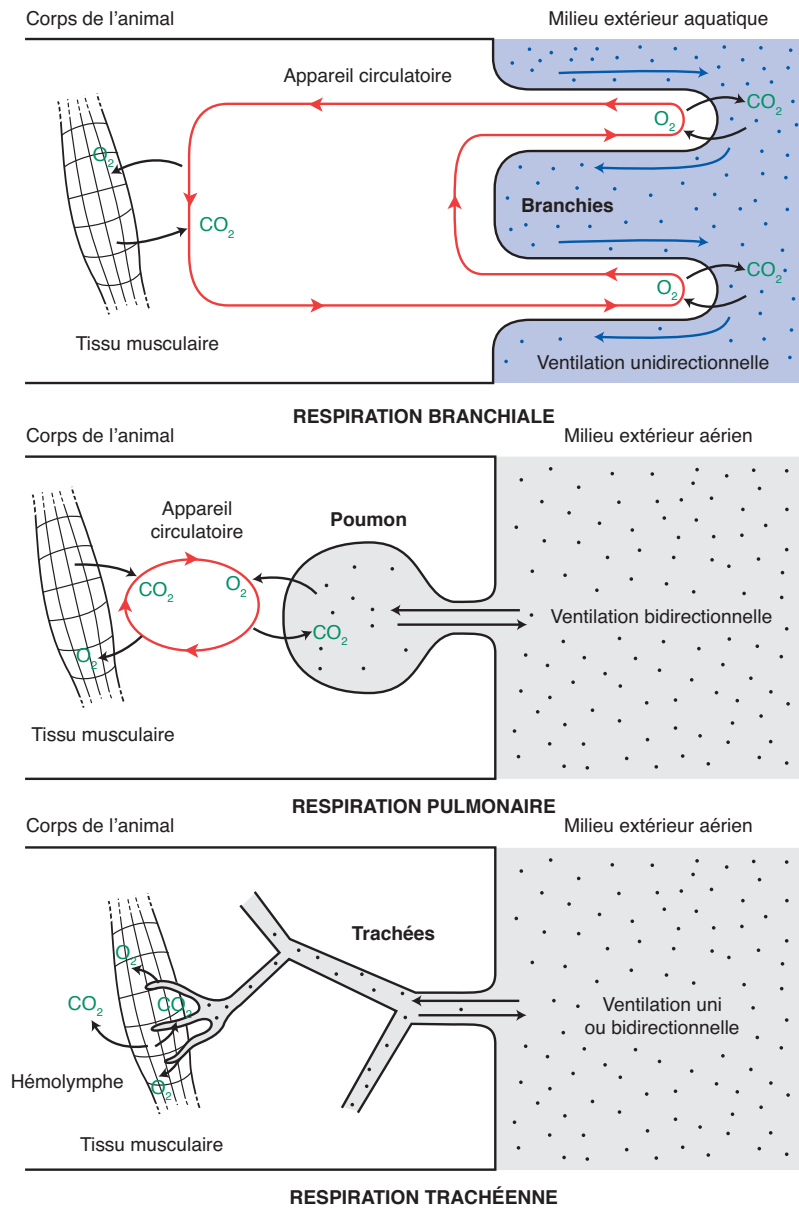
L'eau est **plus dense** ($\times 1000$) et **plus visqueuse** ($\times 54$) que l'air : la mise en mouvement d'un volume d'eau est plus coûteuse énergétiquement que celle du même volume d'air.

D'autre part, la poussée d'Archimède dépend de la densité, elle est donc très supérieure en milieu aquatique, ce qui assure le **soutien des surfaces d'échanges respiratoires.**

Enfin, les surfaces d'échanges des gaz sont aussi des surfaces d'échange d'eau, or le milieu aérien est un milieu desséchant, d'où la nécessité de limiter les pertes d'eau et d'assurer l'humidification permanente des surfaces d'échanges.

Figure 1.3

Organisation fonctionnelle de quelques appareils respiratoires



Les échanges gazeux respiratoires se font par diffusion dans le sens des gradients de pression partielle; ils obéissent à la loi de Fick. Ils sont réalisés soit directement entre les cellules et l'environnement dans le cas où les distances sont réduites, soit par l'intermédiaire d'un fluide circulant. Dans ce cas, les échanges de gaz respiratoires entre l'organisme et l'environnement se font au niveau de surfaces d'échanges adaptées aux contraintes du milieu de vie, aérien ou aquatique.