

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université A. Mira de Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques de l'environnement

Cours

Les adaptations animales

Au profit des étudiants de Master II Biologie Animale

Dr. Saida MEZIANI

Année universitaire : 2024-2025

Préambule

Ce polycopié, destiné aux étudiants de Master II Biologie Animale, explore les adaptations des animaux pour accroître leurs chances de survie et leur reproduction dans différents environnements. Il couvre les adaptations morphologiques et physiologiques des animaux à leur milieu, ainsi que les réponses des animaux aux variations de température.

Les principaux thèmes incluent :

- **Adaptations morphologiques** : classification des animaux selon leurs modes de déplacement (poissons/nageoires, oiseaux/ailes, animaux terrestres/pattes).
- **Adaptations physiologiques** : alimentation adaptée au milieu, respiration et circulation (adaptations des systèmes respiratoires aux contraintes environnementales, transport des gaz respiratoires, réponses à l'altitude et à la plongée) et l'équilibre hydrominéral (filtration, régulation osmotique en eau salée et douce, excrétion azotée, et régulation hormonale de l'équilibre hydrique).
- **Réponses thermiques** : stratégies d'endothermie, d'ectothermie, d'hibernation et d'hétérothermie selon les groupes animaux.

Le cours est conçu de manière pédagogique avec des illustrations, des résumés et des exemples concrets pour aider les étudiants à assimiler les concepts.

Liste des figures

Figure	Titre	N° Page
1	Adaptation des êtres vivants à leur environnement.	1
2	Homologies de membres antérieurs de vertébrés, un exemple d'adaptation du membre pentadactyle.	4
3	Adaptations au vol : des muscles, des ailes puissants, un bréchet et des os creux.	10
4	Trois Pinsons des Galapagos et leur nourriture.	12
5	Les formes de becs chez les oiseaux.	13
6	La dentition chez les mammifères (ruminant, carnivore, insectivore et rongeur).	15
7	Serpent corail à gauche et serpent faux corail à droite.	17
8	Un exemple du mimétisme. Le monarque (à gauche) est un papillon qui, à cause de son alimentation à l'état de chenille, est toxique pour les prédateurs. Le vice-roi (à droite) est totalement inoffensif. Il mime l'apparence du monarque afin de se protéger des prédateurs.	17
9	Les quatre étapes du traitement de la nourriture.	19
10	Comparaison entre le tube digestif d'un herbivore et celui d'un carnivore.	25
11	Circulation ouverte et circulation fermée.	34
12	Circulation simple et circulation double.	35
13	La circulation chez les mammifères, l'anatomie et la physiologie du cœur.	36
14	Echanges de chaleur entre un organisme et son environnement.	51

Table des matières

Introduction

1. Notions d'adaptations	1
1.1. Etymologie de l'adaptation	2
1.2. Historique conceptuel de l'adaptation	2
1.3. Définition	4

Chapitre 1. Adaptations morphologiques des animaux à leur milieu de vie

1.1. Les modes de déplacement des animaux	6
1.1.1. Adaptations à la locomotion en milieu terrestre	7
1.1.2. Adaptations à la locomotion en milieu aérien	9
1.1.3. Adaptations à la locomotion en milieu aquatique	10
1.2. La forme des pattes	11
1.3. La forme du bec chez les oiseaux	12
1.4. La dentition chez les mammifères	14
1.5. Le camouflage et le mimétisme	15

Chapitre 2. Adaptations physiologiques des animaux à leur milieu de vie

2.1. Alimentation des animaux : adaptations à la prise de nourriture	18
2.1.1. L'acte alimentaire chez les animaux	19
2.1.2. La digestion des aliments	23
2.2. Echanges gazeux et respiration	26
2.2.1. Les milieux respiratoires	27
2.2.2. Les surfaces respiratoires	27
2.2.3. Les organes respiratoires	28
2.2.4. Les pigments respiratoires	31
2.3. Adaptations à la circulation	33
2.3.1. Les cavités gastro-vasculaires	33

2.3.2. Les systèmes cardiovasculaires	33
2.3.3. Organisation des systèmes cardiovasculaires chez les vertébrés	34
2.4. Osmorégulation et excrétion	37
2.4.1. L'osmorégulation en milieu marin	37
2.4.2. L'osmorégulation en milieu douce	39
2.4.3. L'osmorégulation chez les espèces migratrice	40
2.4.4. La régulation en milieu terrestre (ou aérien)	41
2.4.5. L'osmorégulation en milieu désertique	42
2.5. Excrétion azotée	43

Chapitre 3. Réponses des animaux aux variations de températures du biotope et adaptations aux rythmes saisonniers

3.1. Tolérance aux températures	45
3.1.1. Tolérance aux températures élevées.....	45
3.1.2. Tolérance au froid et au gel	47
3.2. Régulation thermique	50
3.2.1. Echanges de chaleur entre un organisme et son environnement	50
3.2.1. Régulation thermique chez les endothermes.....	51
3.3. Adaptations comportementales	54
Références bibliographiques	57

Introduction

L'adaptation est un processus par lequel certaines populations se transforment pour accroître leurs chances de survie et de reproduction dans un environnement particulier. Chaque être vivant est doté de capacités d'adaptation qui garantissent sa survie, sa pérennité et sa reproduction.

Sur terre comme en mer, le monde animal est omniprésent. Sa diversité révèle des aptitudes particulières, liant chaque animal à son environnement. Ainsi, certaines espèces se retrouvent aux quatre coins de la planète (Fig.1).



Figure 1. Adaptation des êtres vivants à leur environnement.

1. Notions d'adaptations

1.1. Étymologie de l'adaptation

- **Adapter** : provient du latin *apere* (lier, attacher), dont le participe passé *aptus* (apte) ajouté à la locution *ad* (à, vers) a donné le verbe **adaptare** (ajuster à, en vue de).
- **Adaptation** : dérive du latin médiéval **adaptatio**, attesté au XIII^e siècle, généralisé en français puis en anglais au XVI^e siècle pour désigner l'action **d'adapter** au sens **d'ajuster**.

1.2. Historique conceptuel de l'adaptation

L'adaptation tire sa gloire conceptuelle de la théorie de l'évolution, sujet effleuré depuis longtemps à travers l'éternelle question : « *Qu'est-ce que la vie ?* »

- Anaximandre de Milet est l'un des premiers à avoir suggéré la notion d'évolution de la vie par adaptation à l'environnement (milieu).
- Dans *Histoire des animaux*, Aristote aborde l'influence des climats sur les animaux et l'influence des lieux sur les caractères des animaux, tout en défendant une vision téléologique selon laquelle tout développement biologique s'accomplit dans une optique finale préétablie.
- L'apparition des premières théories évolutives au XIX^e siècle heurta la conception établie d'une vie issue d'une création divine, provoquant une fracture épistémologique d'où émergea la notion d'adaptation.
- L'idée d'une adaptation évolutive provient de la notion d'adaptation au milieu naturel, comme le proposaient les théories transformistes de Lamarck. Cette adaptation transformiste était perçue comme un effort continu des êtres vivants pour tirer profit de leur environnement. Une fois acquise, l'adaptation devenait héréditaire.

- Darwin a utilisé ces observations pour conclure que les différences entre les organismes résultaient de changements graduels au fil du temps. Les organismes présentant des adaptations avantageuses avaient de grandes chances de survivre et de se reproduire, ce qui signifie qu'ils transmettaient plus facilement leurs gènes à la génération suivante. En revanche, ceux qui n'avaient pas ces adaptations avaient moins de chances de survie et de reproduction, ce qui augmentait leur risque de mourir avant de pouvoir transmettre leurs gènes.
- L'explication darwinienne d'une sélection naturelle comme moteur évolutif éclipsa l'adaptation lamarckienne, perçue alors comme un simple résultat évolutif et non comme un processus. Cependant, cette perspective a également rencontré des limites avec la redécouverte des travaux en génétique et la notion d'organisation.
- Les travaux sur l'adaptation biologique de Rabaud (1922) et de Cuénot (1925) marquèrent le début d'une ère féconde pour l'enrichissement de la notion.
- Dans la seconde moitié du XX^e siècle, l'adaptation fut ensuite étudiée à l'échelle des collectivités humaines. Les recherches des années 1990 sur l'auto-organisation, la complexité et la systémique ont contribué au raffinement de l'adaptation, qui est alors devenue un concept.

Les réorientations métaboliques induites conduisent à des transformations morphologiques et physiologiques, déterminant une résistance plus ou moins achevée et efficace de l'individu face à la contrainte. L'adaptation, élément majeur de l'évolution des espèces, correspond donc à une dynamique réactionnelle dont le résultat est la résistance.

L'étude comparée des animaux a apporté un soutien solide à la théorie de Darwin. De très nombreux vertébrés différents, par exemple, présentent des types d'os semblables, indice de leur passé évolutif. Les membres antérieurs représentés (Fig.2) sont tous construits à partir d'un même assemblage d'os, modifiés pour différentes fonctions. Les os de ces divers vertébrés sont dits *homologues*, c'est-à-dire qu'ils ont la même origine dans l'évolution, même s'ils diffèrent actuellement par leur structure et leurs fonctions.

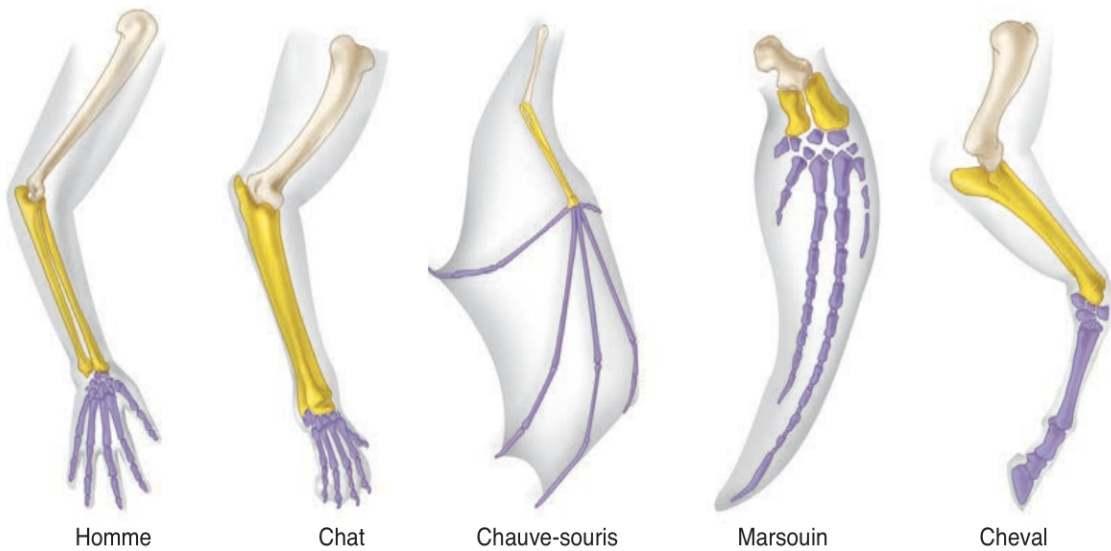


Figure 2. Homologies de membres antérieurs de vertébrés, un exemple d'adaptation du membre pentadactyle.

1.3. Définition

L'adaptation est un processus par lequel certaines populations se modifient pour augmenter leurs chances de survie et de reproduction dans un milieu spécifique. Tout être vivant se caractérise par ses capacités adaptatives, qui assurent sa survie, sa pérennité et sa reproduction. En réponse à une contrainte, ces capacités se manifestent par une série de modifications aux niveaux cellulaire et moléculaire, en fonction des potentialités génétiques de l'espèce.

En **biologie évolutive**, une adaptation est définie comme la modification d'un caractère anatomique ou morphologique, d'un processus physiologique ou d'un trait comportemental au sein d'une population sous l'effet de la sélection naturelle. Ces modifications permettent aux individus d'exploiter les ressources de leur milieu, de se reproduire, de se défendre contre les prédateurs, et de se protéger des aléas climatiques ainsi que d'autres conditions défavorables.

En **physiologie**, l'adaptation trouve tout son sens dans le concept d'**homéostasie**. Évoqué pour la première fois par Bernard en 1859, puis défini par Cannon en 1932, ce concept décrit un état stable maintenu par tous les processus actifs qui résistent aux variations des propriétés de l'organisme.

Cette adaptation de l'organisme aux conditions du milieu s'opère par trois modes : l'éthologie, la physiologie et la morphologie.

- L'adaptation physiologique correspond à la régulation interne de l'organisme, permettant d'assurer les grandes fonctions (nutrition, reproduction, locomotion, etc.) qui répondent aux variations climatiques.
- L'adaptation morphologique, également appelée physique ou anatomique, est la plus visible. Elle se manifeste par une modification d'une partie du corps ou de l'apparence, augmentant ainsi les chances de survie de l'organisme. Par exemple, le camouflage est une adaptation répandue dans la nature.
- L'adaptation *comportementale* concerne les modifications du comportement qui ne sont pas visibles sur le corps de l'animal. Par exemple, le fait de vivre en meute chez le loup constitue une adaptation comportementale.

Au fil des générations, les espèces s'adaptent à leur environnement et aux conditions de vie qui y prévalent.

Chapitre 1.

Adaptations morphologiques des animaux à leur milieu de vie

On parle d'adaptation physique ou morphologique lorsque le milieu oblige une espèce à modifier son apparence ou une partie de son corps afin d'augmenter ses chances de survie.

1.1. Les modes de déplacement des animaux

La locomotion est une fonction essentielle des êtres vivants, principalement chez les animaux, leur permettant de se déplacer activement. Le déplacement est indispensable pour les animaux, car il leur permet :

- ✚ De chercher de la nourriture et de l'eau,
- ✚ De trouver des congénères et de se reproduire,
- ✚ De fuir les prédateurs,
- ✚ de chercher un climat approprié (pour les animaux migrateurs).

L'organisation morphologique et anatomique d'un animal est étroitement liée à son mode de déplacement. Pour se déplacer, certains animaux :

- Marchent : ils sont munis de pattes (vache, mouton, etc.).
- Nagent : ils possèdent des nageoires (poissons, etc.).
- Volent : ils ont des ailes (papillons, oiseaux, etc.).
- Sautent : la forme en Z des pattes arrière (kangourou, lapin, etc.).
- Rampent : absence de pattes (escargot, serpent, etc.).
- Grimpent : les doigts sont munis de griffes (singe, écureuil, etc.).

Un même animal peut se déplacer selon plusieurs modes : le canard marche, nage et vole ; le crocodile marche et nage ; le singe marche et saute ; le Moineau marche et vole ; la grenouille nage et saute.

Certains ont des pattes, d'autres des nageoires ou des ailes. On distingue trois types de

déplacements (locomotions) :

- Le déplacement en milieu terrestre ;
- Le déplacement en milieu aérien ;
- Le déplacement en milieu aquatique.

1.1.1. Adaptations à la locomotion en milieu terrestre

Les modes de déplacement en milieu terrestre sont : la marche, le saut, la reptation et la course.

a. Adaptation à la marche et à la course : pour marcher et courir, les appendices se soulèvent et retombent au sol de manière alternée, créant une chorégraphie qui détermine l'allure. Que ce soit sur deux ou quatre pattes, de nombreux animaux utilisent la marche et/ou la course pour se déplacer.

✚ **Pendant la marche**, il y a toujours un contact avec le sol. Lorsqu'un animal veut avancer, il prend appui sur le pied gauche, soulève son pied droit et le place plus en avant, alternant ainsi les deux pieds pour se déplacer.

✚ **Pendant la course**, il existe un moment où l'animal ne touche plus le sol, grâce à l'impulsion qu'il se donne pour aller plus vite. De nombreux mammifères (comme l'homme, le cheval, le chien, l'éléphant, etc.), ainsi que des oiseaux et des insectes, peuvent se déplacer de cette manière.

On distingue trois types d'animaux selon leur mode de déplacement :

- **Les animaux plantigrades** : ce sont ceux qui marchent sur la plante des pieds, ce qui leur assure un bon appui au sol et une bonne stabilité (l'homme, l'ours).
- **Les animaux digitigrades** : ce sont ceux qui marchent sur les doigts. Leurs doigts, munis de griffes, reposent sur le sol (le chat, le guépard, le chien, etc.).

- **Les animaux onguligrades** : ils se déplacent en s'appuyant sur le sol avec leurs sabots ou leurs ongles (le cheval).

La **marche des arthropodes** (crabes, insectes, etc.) est possible grâce à un exosquelette, qui confère à leur corps la rigidité nécessaire au mouvement. Cet exosquelette fournit également des points d'appui pour les mouvements. Les pattes, ou appendices locomoteurs, qui sont articulées, permettent le déplacement de l'animal.

b. Adaptation à la reptation : de nombreux animaux dépourvus d'appendices locomoteurs avancent en rampant. La reptation est un mode de déplacement sans patte, dont le principe fondamental consiste à pousser vers l'arrière sur le sol pour permettre au corps d'avancer.

- + Le **phoque** utilise cette méthode pour se déplacer sur la glace ou la terre ferme.
- + Le **ver de terre** (lombric) contracte et allonge successivement les différents segments de son corps, s'accrochant à des soies locomotrices qui l'aident à s'ancrer dans le sol et à se déplacer.
- + **L'escargot** utilise son pied musculaire, qui agit en créant une sorte de vague avec ses muscles, un peu comme une danse du ventre.
- + Le **serpent** avance en rampant sur le sol. Il utilise la friction de ses écailles dressées pour pousser contre le sol avec ses puissants muscles. Si son corps était complètement lisse, il se tortillerait sur place sans avancer.

c. Adaptation au saut : le saut peut être un moyen occasionnel de déplacement ou l'unique mode utilisé. Lors d'un bond, la propulsion est assurée par l'extension des membres avant et/ou arrière, et l'animal cesse son appui sur le sol pour s'élever et se projeter à distance. De nombreux animaux, tels que le lapin, le lièvre, la grenouille, le kangourou, la puce, le criquet et la sauterelle présentent une morphologie adaptée au saut :

- + La segmentation et l'articulation des pattes postérieures en forme de Z se préparent

avant le saut et se détendent comme un ressort pour fournir l'impulsion nécessaire et projeter le corps de l'animal plus loin.

- ✚ Les pattes postérieures sont plus longues que les pattes avant.
- ✚ Les cuisses sont massives et puissantes, avec des muscles très développés pour fournir l'impulsion du saut.
- ✚ L'ensemble muscles-tendons-articulation assure le stockage de l'énergie élastique nécessaire au saut.

d. Adaptation au grimper : certains animaux peuvent grimper aux arbres plus facilement que d'autres. Ils peuvent s'y cramponner (comme le chat) ou s'y agripper (comme l'homme). Le chat possède des griffes rétractiles, qu'il peut rentrer ou sortir à volonté. L'homme est également capable de grimper, mais de manière différente : nous nous agrippons aux branches grâce à notre main préhensile, qui est capable de préhension.

1.1.2. Adaptations à la locomotion en milieu aérien

Le vol est le mode de déplacement dans le milieu aérien. Les conditions nécessaires pour vaincre la gravité, se propulser et se diriger sont la légèreté, la puissance et l'aérodynamisme. La sustentation, qui s'oppose à la pesanteur, est réalisée par la force de portance due à la résistance de l'air. Il existe plusieurs types de vol, comme le *vol plané* (où les ailes restent simplement étalées) et le *vol stationnaire* (où l'animal reste immobile dans les airs).

L'aptitude au vol n'est pas exclusive aux oiseaux, car on la retrouve également chez les reptiles du Mésozoïque, chez certains mammifères (chauve-souris, écureuils volants et certaines espèces de primates) ainsi que chez les insectes.

✚ **Adaptation fonctionnelle au vol :** le squelette des oiseaux présente de nombreuses adaptations au vol : il comprend des ailes, des muscles des ailes et du cœur puissants, un bréchet, des os creux pour alléger leur masse (Fig.3), des poumons prolongés par des sacs aériens qui augmentent le volume du corps, une forme aérodynamique, une vue perçante et un sens aigu de l'orientation.

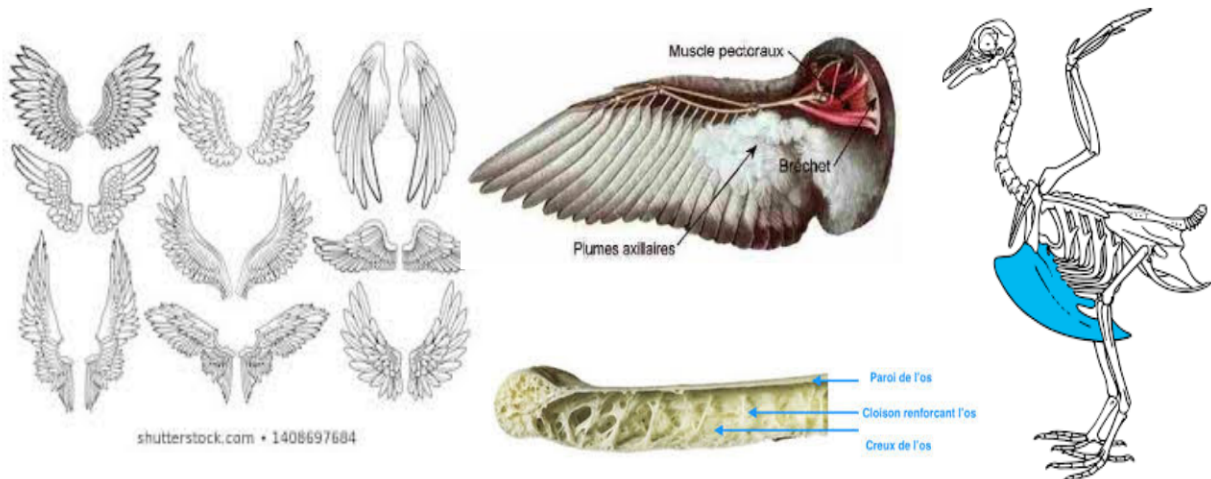


Figure 3. Adaptation au vol : des muscles des ailes puissants, un bréchet et des os creux.

c. Adaptations à la locomotion en milieu aquatique

La nage est la capacité de se déplacer dans l'eau grâce aux seuls mouvements du corps. Lors de la nage, on observe des battements de queue, des ondulations du corps et des changements d'orientation de la tête. Tous les animaux ne maîtrisent pas ce mode de locomotion de la même manière. Les animaux aquatiques (poissons, amphibiens, mammifères marins) se déplacent aisément dans l'eau, qui constitue leur milieu naturel. Cependant, pour d'autres espèces, l'eau peut être un environnement hostile. De nombreux mammifères terrestres nagent par habitude (comme le rat), par goût (comme le chien) ou par nécessité (comme le cerf). À l'inverse, certains, comme le lapin, nagent avec répugnance, tandis que d'autres, comme le chimpanzé, ne savent pas nager. Parmi les reptiles, les crocodiles et les tortues marines, dotés de pattes en forme de rames, sont de bons nageurs, de même que les serpents, qui nagent en ondulant.

- ✚ **Les caractères d'adaptation à la nage** incluent l'hydrodynamisme, une musculature puissante, ainsi que des nageoires ou des pattes palmées ou aplaties. Ces adaptations sont cruciales pour optimiser la locomotion aquatique et survivre dans des milieux aquatiques variés.

1.2. La forme des pattes

Les pattes des animaux leur permettent de creuser, de nager, de grimper, de sauter ou d'effectuer toutes autres actions nécessaires à leur survie dans leur milieu. On distingue différents types de pattes :

- ✚ **Les animaux qui se déplacent par bond** ont généralement les membres postérieurs plus développés que les membres antérieurs. Chez le **Kangourou**, après un long processus évolutif, les membres postérieurs se sont modifiés pour permettre à l'animal d'effectuer des bonds très puissants.
- ✚ **D'autres animaux**, en revanche, **creusent**, que ce soit pour trouver leur nourriture, pour se créer un abri temporaire ou pour établir des tunnels. C'est le cas des **taupes**, des animaux dits fousseurs, qui ont les pattes avant modifiées pour leur permettre de déployer la force nécessaire afin de creuser des galeries souterraines ou des terriers.
- ✚ **Très peu d'animaux peuvent grimper sur les vitres** et se déplacer la tête en bas sur des plafonds lisses. Vous avez certainement observé que les mouches, les **araignées** et les **geckos** en sont capables. Mais comment font-ils ? Les pattes des **geckos** sont dotées de petits coussinets recouverts de millions de soies, dont les extrémités se ramifient en centaines de petites branches, ou *spatules*, mesurant chacune environ 200 nm de large. Les **mouches** et les **araignées** possèdent des structures similaires qui leur permettent de se déplacer ainsi.
- ✚ La forme des pattes chez les oiseaux varie, et l'on distingue plusieurs types :

- **Les pattes anisodactyles** : présentes chez les merles, les mésanges, les moineaux, ainsi que chez les pigeons, les faucons et de nombreux autres oiseaux. Ces oiseaux possèdent un hallux puissant qui leur permet de se poser sur les branches en toute stabilité.
- **Les pattes lobées ou lobulées** : présentes chez les espèces terrestres, ces pattes sont munies de griffes arrière qui empêchent l'animal de s'enfoncer dans la boue, le sable ou d'autres surfaces molles.
- **Les pattes palmées anisodactyles** : caractéristiques des espèces aquatiques comme les canards, les oies et les mouettes, où les trois doigts avants sont reliés par une membrane digitale.

1.3. La forme du bec chez les oiseaux

L'une des adaptations physiques les plus remarquables chez les animaux est la forme du bec chez les oiseaux, permettant souvent de déduire le régime alimentaire en l'observant. Lors de son expédition aux îles Galápagos en 1835, Darwin remarqua que les animaux variaient d'une île à l'autre. Il observa notamment quatorze espèces de pinsons, dont la forme du bec différait selon l'île où ils vivaient. Les trois espèces illustrées ici se nourrissent de façon très distincte (Fig.4), et les formes de leurs becs représentent des adaptations évolutives aux types de nourriture disponibles dans leurs habitats.



Figure 4. Trois Pinsons des Galapagos et leur nourriture.

On distingue plusieurs types de formes de becs chez les oiseaux (Fig.5), qui sont :

- ✚ L'oiseau **omnivore** possède un bec puissant, de longueur et de taille moyennes, ce qui lui permet de manger de tout : graines, insectes, fruits, etc.
- ✚ Le bec de l'oiseau **insectivore** est plutôt large et pointu, ce qui lui permet de se nourrir d'insectes en vol. D'autres insectivores, comme le Pic, peuvent creuser dans l'écorce des arbres pour y saisir des insectes.
- ✚ Les différents oiseaux de proie **carnassiers** se caractérisent par un bec court, crochu et puissant, qui leur permet de déchirer et d'arracher la chair de leurs proies pour s'en nourrir.
- ✚ L'oiseau **granivore** possède un bec court, large et très puissant, ce qui lui permet d'exercer une forte pression afin de briser les graines.
- ✚ Le long bec du flamant rose, qui est un carnivore **filtreur**, lui permet de filtrer les eaux de surface à la recherche de nourriture (petits poissons, vers, larves, etc.).
- ✚ Les oiseaux **nectarivores**, comme le colibri, ont un bec très fin qui leur permet de s'abreuver du nectar dans les fleurs.

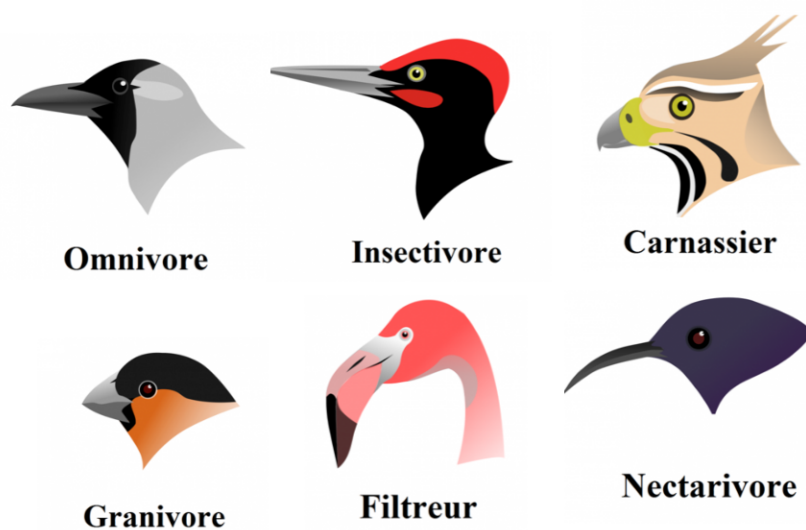


Figure 5. Les formes de becs chez les oiseaux.

1.4. La dentition chez les mammifères

La denture des mammifères illustre parfaitement l'adaptation structurale en fonction du régime alimentaire. De nombreux aspects de la dent sont influencés par des mécanismes adaptatifs. En général, les mammifères possèdent une denture plus spécialisée que celle des autres vertébrés, bien que certaines exceptions existent. Par exemple, les serpents venimeux, comme les crotales, sont équipés de crochets : des dents modifiées qui injectent du venin dans leurs proies. Certains de ces crochets sont creux, à la manière de seringues, tandis que d'autres laissent le venin s'écouler goutte à goutte le long de rainures présentes sur la surface des dents.

Les types de denture des mammifères sont les suivants (Fig.6) :

- ✚ Les **carnivores** possèdent des incisives et des canines très pointues pour tuer leurs proies et déchirer la chair. Leurs prémolaires et molaires tranchantes, permettent de déchiqeter et de broyer la nourriture (ex. chien, chat, etc.).
- ✚ Les **herbivores** n'ont souvent les incisives qu'à la mâchoire inférieure et sont dépourvus de canines. Leurs prémolaires et molaires sont larges et aplaties, idéales pour broyer l'herbe avant de l'avalier (ex. chevaux, cerfs, etc.).
- ✚ Les **rongeurs** ont des incisives à croissance continue et très tranchantes pour couper les branches, et leurs molaires puissantes sont adaptées pour broyer l'écorce. Ils ne possèdent pas de canines (lapin, souris, etc.).
- ✚ Les **insectivores** ont des dents tricuspides bien adaptées à déchiqeter les carapaces chitineuses des insectes qu'ils consomment (l'hérisson, la taupe, les musaraignes, etc.).

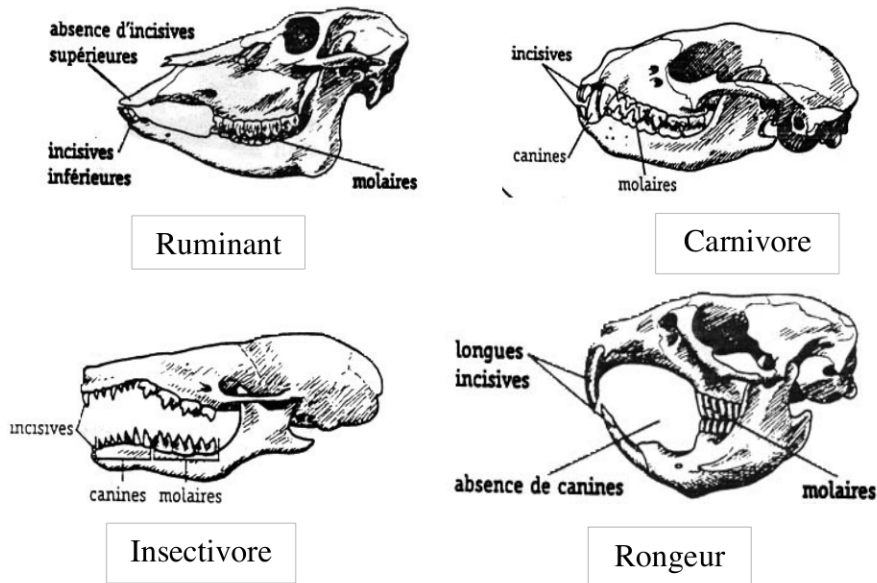


Figure 6. La dentition chez les mammifères (ruminant, carnivores, insectivores et rongeur).

1.5. Le camouflage et le mimétisme

a. Le camouflage : c'est une adaptation très répandue dans la nature, permettant à un animal de se confondre avec son environnement. Il se camoufle en imitant les couleurs et les formes environnantes, comme un déguisement, pour échapper aux prédateurs ou, dans le cas des prédateurs eux-mêmes, pour s'approcher discrètement de leurs proies. Ce phénomène est présent dans tout le règne animal, avec des exemples variés : certains animaux se fondent dans la végétation, d'autres dans le fond marin, et certains imitent même des fientes d'oiseaux. La majorité des animaux nocturnes se camouflent pendant la journée, car ils doivent passer inaperçus lorsqu'ils dorment. C'est le cas de plusieurs espèces :

- ✚ Le **caméléon**, célèbre pour son changement de couleur, utilise des cellules pigmentaires appelées **chromatophores** pour mieux s'adapter à son environnement.
- ✚ Divers **insectes** imitent l'apparence de brindilles ou de feuilles, comme les phasmes, rendant leur détection difficile.
- ✚ Le **papillon de nuit** européen et mongol, avec son apparence brun/gris, se fond dans les troncs d'arbres, difficile à repérer.

- ✚ Le **lagopède des saules**, présent au nord de l'Europe, en Russie, en Sibérie et dans le Nord de l'Amérique du Nord, change de couleur en fonction des saisons, passant d'un plumage brunâtre/orangé en été à un plumage blanc en hiver, pour se camoufler dans la neige.

- ✚ Les **sauterelles** utilisent un camouflage en forme de feuille pour échapper à la vue des prédateurs.

- ✚ La **tortue verte**, vivant dans les eaux chaudes, peut ajuster les couleurs de sa carapace et de sa peau pour se confondre avec son environnement.

- ✚ Le **Kareius bicoloratus** est bicolore. Il adapte sa couleur au sol marin pour rester invisible à ses prédateurs et proies.

- ✚ Le **gecko à queue de feuilles** a une apparence brunâtre et nervurée qui le fait ressembler aux nervures des végétaux, lui offrant un camouflage parfait et se confondant avec son environnement.

- ✚ Le **lézard à cornes**, présent principalement en Amérique du Nord et Centrale, utilise son aspect rocailleux pour se confondre dans l'environnement désertique et résiste aisément aux chaleurs du désert.

b. Le mimétisme : c'est la capacité d'un animal à imiter une caractéristique de l'environnement ou d'une autre espèce animale. L'animal doté de cette adaptation reproduit en détail l'anatomie, voire le comportement, d'une espèce qui repousse les prédateurs. L'espèce mimétique diminue les risques d'attaque. Souvent, les espèces imitées sont non comestibles ou dangereuses pour le prédateur. Voici quelques exemples de mimétisme :

- ✚ De nombreuses espèces (insectes, papillons, grenouilles, serpents, etc.) arborent des couleurs vives qui signalent aux prédateurs une espèce toxique, alors qu'elles ne présentent aucun danger. **La mante orchidée** imite l'apparence d'une fleur, attirant ainsi des insectes pollinisateurs qui se posent sur elle et deviennent rapidement des proies.

- ✚ **Les poissons-scies**, présents dans les récifs coralliens. Ils possèdent des épines dorsales rappelant les branches du corail, les aidant à se fondre dans le paysage sous-marin pour échapper aux prédateurs.
- ✚ Certains animaux se déguisent en d'autres. C'est le cas de la couleuvre américaine, qui adopte les mêmes couleurs vives et les motifs limitant le serpent corail (Fig.7). Les prédateurs évitent donc le serpent faux-corail en pensant qu'il est aussi dangereux que son homologue venimeux.



Figure 7. Serpent corail à gauche et serpent faux corail à droite.

- ✚ Les papillons dont les ailes sont ornées de grands motifs circulaires (les ocelles) évoquent des yeux d'oiseaux. **Le papillon monarque** est un excellent exemple de mimétisme (Fig.8).

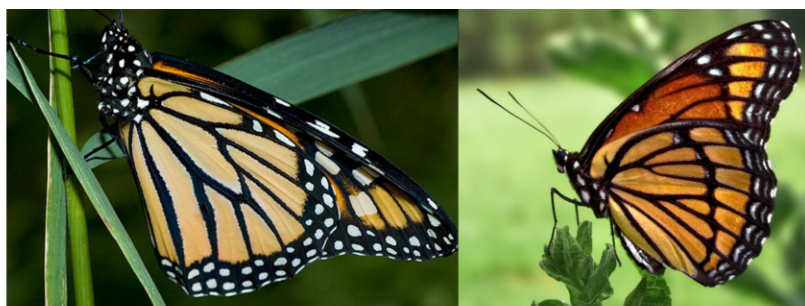


Figure 8. Un exemple du mimétisme. Le monarque (à gauche) est un papillon qui, à cause de son alimentation à l'état de chenille, est toxique pour les prédateurs. Le vice-roi (à droite) est totalement inoffensif. Il mime l'apparence du monarque afin de se protéger des prédateurs.

Chapitre 2.

Adaptation physiologique des animaux à leur milieu de vie

Les adaptations physiologiques correspondent aux modifications métaboliques des organismes et de leur équipement enzymatique. Par exemple, dans les milieux arides, les animaux présentent des adaptations leur permettant de :

- ✚ Economiser l'eau : sudation réduite, urine concentrée, excréments secs, etc.
- ✚ Se passer de boire pendant de longues périodes, comme les gazelles Dorcas et les gerboises, qui se contentent de l'eau contenue dans leur alimentation.
- ✚ Synthétiser de l'eau par oxygénation des graisses de réserves stockées dans les cellules, comme c'est le cas pour la bosse des dromadaires.

2.1. Alimentation des animaux : adaptations à la prise de nourriture

Pourquoi s'alimenter ? Tous les animaux ont besoin de manger pour répondre à des contraintes vitales et continuer à vivre, notamment pour survivre et se reproduire. Ils doivent collecter des aliments et les transformer en nutriments pour assurer le renouvellement cellulaire, la croissance, la reproduction et couvrir leurs dépenses énergétiques. Chaque espèce possède un type d'alimentation propre, qui dépend de son groupe. Selon leur mode d'alimentation, on distingue trois types d'animaux :

- **Herbivores** : tels que les bovins, les concombres de mer et les termites, ils se nourrissent principalement de plantes ou d'algues.
- **Carnivores** : comme les requins, les buses et les araignées, ils dévorent d'autres animaux.
- **Omnivores** : leur régime alimentaire est très varié, comprenant à la fois des d'animaux et des plantes ou algues. Les humains, omnivores, tout comme les cafards et les corbeaux, sont également des omnivores.

2.1.1. L'acte alimentaire chez les animaux

Les animaux ont besoin de nourriture pour assurer leur fonctionnement, leur intégrité et leur croissance. Cette nourriture se présente sous diverses formes, et les animaux peuvent être classés selon le mode de prise des aliments qu'ils ingèrent.

Les principales étapes du traitement des aliments sont : l'ingestion (la prise de nourritures), la digestion, l'absorption et l'élimination (Fig.9).

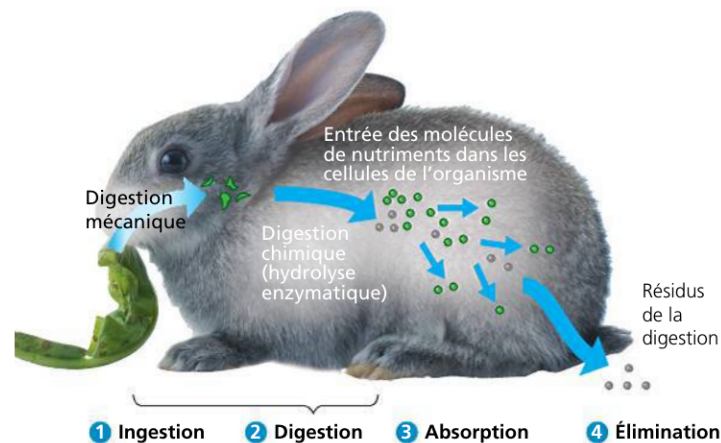


Figure 9. Les quatre étapes du traitement de la nourriture.

a. La prise alimentaire ou l'ingestion

L'animal peut se procurer sa nourriture en utilisant une gamme variée de procédés mécaniques qui déterminent la nature des aliments qu'il peut obtenir et utiliser. Les mécanismes de prise de nourriture et les organes qui les assurent (dents, becs, pièces buccales) sont en relation avec la structure des aliments consommés.

Les types alimentaires des organismes animaux peuvent être regroupés en trois catégories principales en fonction de la nature ou de la taille des particules ingérées :

- ✚ L'absorption : consommation des aliments liquides ou ramollis.
- ✚ La microphagie : consommation des aliments microscopiques.
- ✚ La macrophagie : consommation des aliments macroscopiques.

Pour chacune de ses étapes, des *adaptations sont nécessaires* en fonction du régime alimentaire.

L'absorption des aliments

Les animaux qui se nourrissent exclusivement d'aliments liquides sont souvent très spécialisés et très adaptés à leur source alimentaire. Les espèces qui utilisent ce mécanisme absorbent des liquides riches en nutriments provenant d'un hôte vivant. C'est le cas des :

- **Insectes phytophages** : elles se nourrissent des liquides nutritifs des végétaux prélevés après perforation. Par exemple, les lépidoptères, les diptères et les colibris qui sucent le nectar des fleurs possèdent une trompe formée par hypertrophie d'une partie de leurs maxillaires.
- **Suceurs de sang** : ils perforent l'épiderme de leur hôte à l'aide d'une pièce buccale modifiée, présentant une partie vulnérante semblable en forme de stylet, qui agit comme une aiguille pour pénétrer la peau. Parmi eux, se trouvent les insectes hématophages, tels que les moustiques, les tiques, les punaises et les sangsues.
- **Jeunes mammifères**, ces animaux s'alimentent du lait maternel sans outils spécialisés.
- Certains **oiseaux** nourrissent leurs oisillons avec une sécrétion proche du lait, qui est sécrétée par le jabot (comme chez le pigeon) et l'œsophage (comme chez le pingouin).
- **Araignées**, ils présentent un cas particulier. Elles percent les proies et injectent des sucs digestifs qui liquéfient les tissus. La bouillie formée est ensuite aspirée par la bouche, filtrée par les soies et stockée dans le jabot.

Microphagie ou nutrition par filtration

Les particules alimentaires sont de très petite taille et doivent être prélevées en masse dans le milieu, sous forme de plancton ou de particules organiques en suspension. Le prélèvement se fait par filtration du milieu, ce qui nécessite des adaptations spécialisées. De nombreux animaux se nourrissent par filtration et sont appelés suspensivores, « *suspension feeders* ». Voici quelques exemples :

- **Éponges** : l'eau est entraînée dans la grande cavité (spongiocoele) par les battements des cils. Les cellules retiennent les particules qui passent à leur extrémité.
- **Lombrics** : appelés également limivores, ils ingèrent le sable ou la boue, puis trient les particules organiques mélangées à la fraction minérale.
- **Polychètes tubicoles** : ces animaux détritivores ingèrent des particules déposées au fond d'une phase liquide après décantation.
- **Mollusque** : les cellules muqueuses de leur bouche assurent l'agglomération des particules alimentaires.
- **Crustacées** : leurs appendices buccaux, pourvus de soies filtrantes, retiennent les aliments, tandis que l'eau sorte par la cavité branchiale.
- **Larve d'amphibiens** : la chambre branchiale contient des branchies munies de plaques filtrantes qui capturent les particules organiques (comme chez *Xenopus laevis*).
- **Poissons pélagiques**: les lamelles branchiales retiennent les particules alimentaires qui entrent dans la bouche.
- **Oiseaux** : les lamelles suspendues à la mâchoire supérieure filtrent l'eau qui entre dans leur bouche (comme chez les oiseaux filtreurs, par exemple les flamants roses).

- **Mammifères** : les baleines ingèrent de petits crustacés d'une dizaine de centimètres et retiennent du plancton grâce à leurs fanons cornés suspendus aux mâchoires supérieures.

La Macrophagie

Les macrophages choisissent leurs aliments après une approche impliquant des systèmes sensoriels. La prise alimentaire est discontinue. Ces animaux ingèrent des aliments solides, qui peuvent être de grande taille ou constituer des parties de proies animales ou végétales. De nombreux groupes appartiennent à cette catégorie, parmi lesquels on distingue :

◇ *Les animaux qui se nourrissent des proies animales* : ils possèdent une région buccale différenciée en un appareil prédateur, adapté à la mastication et à la trituration des proies. La prise alimentaire est discontinue. C'est le cas des :

- **Mollusques** : les proies sont rappées grâce à une radula hautement perfectionnée et très adaptée, qui les réduit en petits fragments avant qu'ils ne passent dans le tube digestif.
- **Invertébrés** : les proies captées par les dents sont directement avalées sans être mastiquées.
- **Oiseaux** : les aliments sont ramollis et stockés dans le jabot, tandis que la fragmentation se fait dans le gésier.
- **Mammifères** : les proies sont fragmentées par mastication avant d'être avalées.
- **Poissons, reptiles et amphibiens** : les dents sont pointues et identiques, servent à saisir les proies, à l'exception des mangeurs de coquillages qui possèdent des dents broyeuses, comme la Raie.
- **Crustacés** : les proies sont attrapées par certaines pièces buccales, puis découpées avec les mandibules, comme chez la langoustine.

◊ **Les animaux qui se nourrissent des proies végétales** : ce sont des animaux phytophages ou herbivores.

- **Chez les Vertébrés :**

- Les Mammifères herbivores possèdent une denture à croissance continue, parfaitement adaptée à leur régime alimentaire. Ils broutent des feuilles grâce à un appareil masticateur spécialisé. Les canines sont peu développées ou absentes, et il existe un espace entre les incisives et les molaires ainsi que les prémolaires.
- Les rongeurs fragmentent le bois et les graines en copeaux à l'aide d'incisives à croissance continue.
- Les oiseaux granivores disposent de becs puissants et courts, adaptés à leur alimentation.

- **Chez les invertébrés :**

Les appendices céphaliques sont très adaptés à la préhension et au découpage par les mandibules, permettant de pousser la nourriture dans la bouche tout en la broyant. Des insectes tels que le criquet ou le hanneton broutent des feuilles grâce à un appareil broyeur.

b. La digestion des aliments

La digestion correspond à l'utilisation des aliments et à leur transformation en nutriments facilement assimilables. Ce processus se déroule de façon séquentielle, et les systèmes digestifs sont dotés de plusieurs régions fonctionnelles bien définies. On distingue deux types de digestion : la digestion intracellulaire et la digestion extracellulaire.

Digestion intracellulaire

La nourriture est absorbée par endocytose (phagocytose ou pinocytose) par diverses cellules formant des vacuoles digestives. Les Protozoaires et les Spongiaires se distinguent des autres animaux en digérant entièrement leur nourriture grâce à ce mécanisme intracellulaire. Elle fait intervenir des *enzymes lysosomiales*, après la fusion des vacuoles digestives nouvellement formées avec des lysosomes, formant ainsi des phagolysosomes.

Digestion partiellement extracellulaire

Chez les Cnidaires (comme l'Hydre, la Méduse et le Corail), la digestion est partiellement extracellulaire. Des enzymes digestives sont libérées dans une cavité gastro-vasculaire commune, où elles commencent à décomposer les aliments. Les particules alimentaires pénètrent dans les cellules endodermiques par endocytose et subissent l'action des enzymes digestives.

Digestion extracellulaire

Ce type de digestion permet à un animal de consommer des proies beaucoup plus grandes que celles pouvant être phagocytées. Elle se déroule dans le tube digestif en présence d'enzymes spécifiques, adaptées au régime alimentaire de l'animal. Ces enzymes fonctionnent dans des conditions de pH optimales, adaptées pour chaque type de régime. Le tractus digestif présente des variations structurelles entre les différents groupes d'animaux, reflétant leurs adaptations spécifiques à divers types d'aliments.

- Les **vertébrés carnivores** possèdent souvent un estomac très extensible. Étant parfois privés de nourriture pendant de longues périodes, ils doivent consommer de grandes quantités lorsqu'ils capturent une proie. Par exemple, un Lion d'Afrique de 200 kg peut consommer jusqu'à 40 kg de viande en un seul repas. La longueur du système digestif des Vertébrés est également liée à leur régime alimentaire.

- Les **herbivores** et les **omnivores** ont un tube digestif plus long que celui des carnivores. Un tube digestif plus long permet de prolonger la digestion et d'augmenter la surface d'absorption des nutriments. La comparaison entre le tube digestif d'un herbivore et celui d'un carnivore met en évidence des adaptations remarquables, souvent liées au régime alimentaire des animaux (Fig.10).

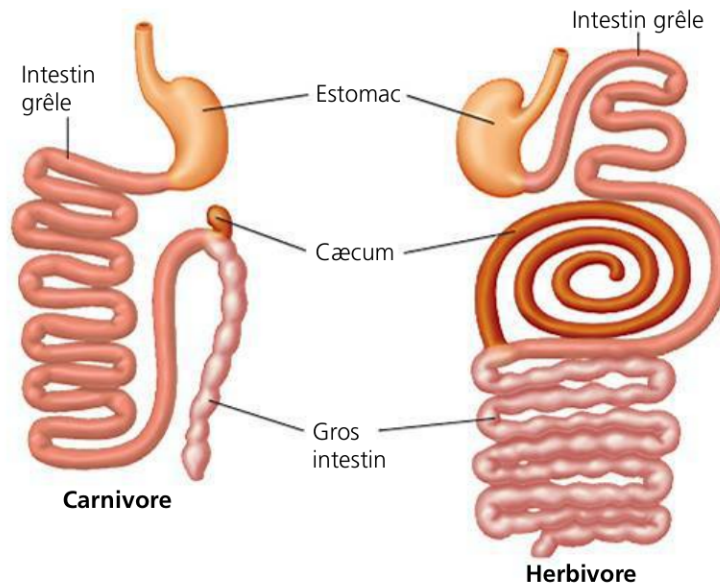


Figure 10. Comparaison entre le tube digestif d'un herbivore et celui d'un carnivore.

Chez les vertébrés, des adaptations remarquables sont souvent liées au régime alimentaire de l'animal, notamment par des mécanismes de **symbiose** ou des **adaptations mutualistes**. Ces adaptations permettent une bonne utilisation des ressources alimentaires et améliorent l'efficacité digestive. Voici quelques exemples :

- **Les bactéries mutualistes des herbivores non-ruminants, comme les lapins,** vivent dans leur caecum et leur côlon, permettent une fermentation des fibres. Ils ingèrent une partie de leurs matières fécales (cæcotrophie) pour récupérer les nutriments en faisant repasser les aliments dans leur tube digestif.
- **L'hoazin, un oiseau herbivore des forêts tropicales d'Amérique du Sud,** présente une adaptation digestive unique parmi les oiseaux. Il possède un grand jabot musculueux, une poche œsophagienne abritant des microorganismes symbiotiques capables de décomposer la cellulose des plantes dont il se nourrit.

- **Les adaptations les plus complexes liées à un régime alimentaire herbivore ont évolué chez les ruminants**, tels que la vache, la chèvre, la girafe, le cerf, etc. Les adaptations les plus complexes liées à un régime alimentaire herbivore ont évolué chez les ruminants, tels que la vache, la chèvre, la girafe et le cerf. Ces animaux possèdent un système digestif spécialisé qui leur permet de digérer la cellulose des plantes, un processus difficile pour la plupart des vertébrés. Dans le rumen, une abondante colonie de protozoaires et de bactéries anaérobies entretient une fermentation intense.
- **De véritables cellulases ont été signalées dans le tube digestif de nombreux invertébrés**, notamment ceux qui consomment du bois. Les insectes xylophages tels que les termites ou certaines blattes américaines, qui se nourrissent principalement du bois, hébergent d'importantes populations de bactéries et de protozoaires symbiotiques, comme les Trichomonadines chez les termites. Ces microorganismes mutualistes produisent des cellulases qui dégradent la cellulose en monosaccharides et d'autres composés. De plus, de vraies cellulases ont également été signalées chez les mollusques (comme l'escargot de Bourgogne et le Taret), les crustacés (Mysis), et certains insectes comme les lépismes (poissons d'argent), qui utilisent l'enzyme pour digérer efficacement la cellulose.

2.2. Échanges gazeux et respiration

Les échanges entre un animal et le milieu extérieur se déroulent au niveau cellulaire, jouant un rôle crucial dans le maintien de l'homéostasie et le fonctionnement des organes. L'utilisation de l'oxygène (O₂) et le rejet du dioxyde de carbone (CO₂) sont des fonctions essentielles de tous les organismes aérobies.

Chez les organismes unicellulaires, ces échanges se font directement avec le milieu, ce qui permet une diffusion rapide des gaz et des nutriments à travers la membrane cellulaire.

En revanche, la plupart des organismes multicellulaires ne peuvent pas effectuer des échanges directs entre chacune de leurs cellules et l'environnement. Ils ont donc développé des systèmes spécialisés pour faciliter ces échanges avec le milieu et qui transportent ensuite les substances reçues vers le reste du corps.

Selon que l'animal vit dans l'air ou dans l'eau, les contraintes imposées par les lois de la diffusion varient considérablement. Ces différences, associées à d'autres caractères des milieux de vie (tels que la densité, la viscosité, la charge en eau, la poussée d'Archimède, etc.), influencent directement la nature et l'organisation des surfaces d'échanges respiratoires.

2.2.1. Les milieux respiratoires

Les conditions des échanges gazeux varient considérablement, selon que la source d'oxygène est l'air ou l'eau. Les échanges gazeux sont beaucoup plus exigeants lorsqu'ils se produisent dans l'eau. La quantité d'oxygène dissous dans un volume d'eau donné varie, mais elle reste très inférieure à celle de l'oxygène contenu dans un volume d'air équivalent. Les océans, les lacs et les autres plans d'eau ne contiennent que de 4 à 8 mL d'oxygène dissous par litre, soit près de 40 fois moins que la concentration dans 1 L d'air.

De plus, plus l'eau est chaude et salée, moins elle contient d'oxygène dissous. Le faible taux d'oxygène dans l'eau, sa grande densité et sa viscosité élevée signifie que les échanges gazeux chez les poissons et les crustacés requièrent beaucoup d'énergie.

En raison de ces contraintes physicochimiques, des adaptations ont émergé au cours de l'évolution, rendant les échanges gazeux beaucoup plus efficaces chez la plupart des animaux aquatiques. Plusieurs de ces adaptations concernent la structure des surfaces respiratoires impliquées dans ces échanges.

2.2.2. Les surfaces respiratoires

La surface respiratoire est la partie du corps de l'animal où s'effectuent les échanges gazeux avec le milieu. Sa structure est généralement bien adaptée à ce rôle. Le transport membranaire de l'O₂ et du CO₂ s'effectue entièrement par diffusion simple. La vitesse de diffusion est directement proportionnelle à l'air de la surface respiratoire.

- ✚ Chez certains animaux relativement simples, notamment les éponges, les cnidaires et les vers plats, la membrane plasmique des cellules du corps est proche de l'environnement externe, ce qui permet aux gaz de diffuser vers l'extérieur et vers l'intérieur.
- ✚ Dans plusieurs groupes d'animaux, c'est la surface cutanée externe qui sert d'organe respiratoire. Par exemple, le ver de terre possède une peau humidifiée et échange les gaz par diffusion à travers toute sa surface corporelle.

La surface cutanée de la plupart des autres animaux est incapable d'assurer les échanges gazeux pour l'ensemble de l'organisme. L'évolution d'organes respiratoires présentant de multiples replis ou ramifications a résolu le problème. Les branchies, les trachées et les poumons sont les trois types d'organes respiratoires les plus courants.

2.2.3. Les organes respiratoires

a. Les branchies chez les animaux aquatiques

Les branchies sont des évaginations de la surface de l'organisme, spécialisées dans les échanges respiratoires. Ce sont des structures richement vascularisées, formées par un épithélium très mince. L'eau qui baigne les branchies n'est séparée du liquide circulant (sang ou hémolymphe) que par une fine couche de tissu. On les retrouve chez un grand nombre d'invertébrés (annélides, mollusques, crustacés, etc.) et chez certains vertébrés aquatiques, comme les poissons et les larves d'amphibiens.

Le mouvement autour et au-dessus de la surface respiratoire est appelé *ventilation*. Pour favoriser cette ventilation, la plupart des animaux dotés de branchies les remuent dans l'eau où déplacent l'eau autour d'elles, par exemple :

- ✚ Les écrevisses et les homards possèdent des appendices ressemblant à des *pagaies* qui font circuler l'eau à proximité de leurs branchies.
- ✚ Les moules et les palourdes remuent l'eau à l'aide de cils qui la font circuler autour des surfaces d'échange.

- ✚ Les pieuvres et les calmars ventilent leurs branchies en aspirant de l'eau et en la refoulant, profitant ainsi de cette circulation d'eau pour se mouvoir.
- ✚ Chez les Annélides fouisseurs et tubicoles, les mouvements péristaltiques des branchies entretiennent un courant d'eau à l'intérieur du terrier, permettant de renouveler le milieu environnant.
- ✚ Chez les Mollusques, le renouvellement de l'eau au contact des branchies est assuré par les battements des cils qui recouvrent la surface des lamelles. La disposition des vaisseaux afférents permet à l'hémolymphe de croiser les courants d'eau (dispositif à contre-courant).
- ✚ Chez les Poissons, la ventilation se fait par des mouvements générés lors de la nage, ainsi que par une série de mouvements coordonnés de leur bouche et de leurs branchies. La disposition des capillaires dans les branchies des poissons permet d'effectuer un échange à contre-courant, un échange entre deux liquides circulant dans des directions opposées (l'eau et le sang).

b. Le système trachéen chez les insectes

Les insectes sont particuliers, ils ne font pas appel à un liquide (hémolymphe) pour transporter les gaz sous forme dissoute entre le milieu extérieur et les cellules du corps. Ils utilisent plutôt un système de tubes et de tubules (appelés trachées) qui amènent les gaz directement de l'extérieur jusqu'à proximité des cellules, et vice-versa.

Les trachées s'ouvrent sur le milieu extérieur au niveau de portes appelées stigmates permettant l'entrée d'air dans toutes les ramifications. Ces ramifications forment les trachéoles qui s'enfoncent jusqu'à la surface de presque toutes les cellules. C'est là que les gaz sont échangés par diffusion simple, à travers l'hémolymphe. L'insecte peut ouvrir et fermer ses stigmates pour ainsi contrôler la quantité de gaz échangés (et pour contrôler la perte de vapeur d'eau).

Ce type de circulation ne peut pas assurer un bon déplacement d'air sur de grandes distances, et donc il n'est efficace que pour des organismes de petite taille (une des raisons pour lesquelles les gros insectes sont inexistantes).

c. Les poumons et la respiration pulmonaire

Dans les poumons, le contact entre l'air et le sang se fait au niveau des alvéoles, de petits sacs dont la paroi très fine est accolée à des capillaires sanguins. L'apport en air se fait par des conduits aériens, tels que les bronches et les bronchioles. La surface alvéolaire importante (80 m² par poumon chez l'Homme, par exemple) et la minceur de la membrane d'échange (0.2 à 0.4 mm) permettent une diffusion rapide et efficace des gaz respiratoires. On observe différentes modalités d'utilisation des poumons pour assurer les échanges gazeux.

- ✚ La plupart des Reptiles et tous les mammifères comptent exclusivement sur leurs poumons pour effectuer leurs échanges gazeux. Dans les poumons, le contact entre l'air et le sang se fait au niveau des alvéoles pulmonaires, dont la paroi très fine est accolée à des capillaires sanguins, tandis que l'apport en air se fait par les bronches et les bronchioles.

- ✚ Chez les oiseaux, la structure et le fonctionnement du poumon constituent une exception parmi les vertébrés, probablement en relation avec leur adaptation au vol. Le poumon, dépourvu d'alvéoles, est constitué de tubes associés à des sacs contractiles appelés sacs aériens.

- ✚ Les Amphibiens possèdent des poumons relativement petits, dont la surface d'échange est limitée. Les échanges gazeux de ces animaux dépendent donc essentiellement de la diffusion qui a lieu à travers d'autres surfaces corporelles, notamment à travers la peau.

- ✚ Les tortues constituent une exception : leur respiration pulmonaire s'accompagne d'échanges gazeux qui se déroulent à travers les surfaces épithéliales humides de leur bouche et de leur anus.

- ✚ Certains vertébrés aquatiques, tels que les *poissons pulmonés*, possèdent des poumons, ce qui leur permet d'inspirer directement l'oxygène de l'air. C'est une adaptation à la vie dans des eaux pauvres en dioxygène ou à des séjours prolongés hors de l'eau, par exemple lorsque le niveau de l'eau d'une mare s'abaisse.
- ✚ Les escargots possèdent des poumons plus simples : une invagination vascularisée en forme de sac, où se réalisent les échanges gazeux. Ce poumon, également appelé cavité palléale, est ouvert à l'extérieur par un petit orifice, le pneumostome.
- ✚ Les scorpions et de nombreuses araignées possèdent une ou plusieurs paires de poumons en feuillets, en plus du système trachéen. Les membranes tissulaires de ces poumons sont organisées comme les pages d'un livre, autour desquelles circule l'hémolymphe.

d. La peau et la respiration cutanée

La peau est un organe respiratoire efficace : certains poissons, comme l'anguille, et les amphibiens utilisent principalement la peau comme surface d'échange gazeux. Les têtards, bien qu'ils possèdent des branchies et des poumons, effectuent environ 60 % de leurs échanges respiratoires par la peau. Certaines salamandres tropicales, quant à elles, respirent exclusivement par la peau.

Chez les mammifères, les chauves-souris utilisent les membranes très vascularisées de leurs ailes comme organe respiratoire supplémentaire.

2.2.4. Les pigments respiratoires

La plupart des animaux transportent la majeure partie de l'O₂ dans leur sang en l'attachant à des protéines spéciales appelées pigments respiratoires, plutôt que de le transporter sous forme dissoute. Ces pigments sont des métalloprotéines, contenant souvent du fer ou du cuivre. Ces métaux donnent une couleur à la molécule, et donc on appelle ces transporteurs d'oxygène des « pigments ». Au cours de l'évolution, une grande variété de pigments respiratoires est apparue chez différentes espèces animales.

Exceptions intéressantes : les animaux sans pigments respiratoires.

- Chez les invertébrés, les pigments respiratoires sont souvent dissous dans le sang ou dans l'hémolymphe.
- Les poissons de la famille des Chaenichthyidae vivent dans les eaux froides de l'Antarctique. Leur sang n'a pas de pigment respiratoire. Mais leur sang est froid et donc la solubilité de l'oxygène y est meilleure, et leur faible métabolisme à ces froides températures fait en sorte que leurs besoins en oxygène sont moindres. De plus, leur peau est sans écaille et bien vascularisée, donc la peau contribue aux échanges respiratoires.

Parmi les pigments respiratoires du règne animal, on compte :

- L'hémoglobine (rouge) ;
- L'hémocyanine (bleue).

✚ Chez presque tous les vertébrés et chez de nombreux invertébrés, le pigment respiratoire principal est l'hémoglobine, qui se trouve dans les globules rouges des vertébrés.

✚ Chez les arthropodes et les mollusques, le pigment respiratoire est l'hémocyanine, un pigment à base de cuivre qui donne au sang une couleur bleuâtre.

✚ Les mammifères plongeurs possèdent une forte concentration de myoglobine, adaptations leur permettant de conserver l'oxygène. La myoglobine, un pigment respiratoire non circulant, est localisée dans les muscles des vertébrés. Son affinité pour l'oxygène est supérieure à celle de l'hémoglobine, ce qui permet un transport rapide de l'O₂ du sang vers les muscles et constitue une réserve locale d'oxygène.

2.3. Adaptations à la circulation

Chez les organismes unicellulaires, les échanges avec le milieu externe s'établissent directement. Les nutriments et l'O₂ traversent leur membrane plasmique pour pénétrer dans le cytoplasme, tandis que les déchets métaboliques (comme le CO₂) quittent la cellule en traversant la même membrane. En revanche, la plupart des organismes multicellulaires ne peuvent pas effectuer des échanges directs entre chacune de leurs cellules et le milieu extérieur. Ces organismes possèdent des *adaptations clés ou des systèmes spécialisés* où se déroulent les échanges avec le milieu et qui transportent ensuite les substances reçues vers le reste du corps.

2.3.1. Les cavités gastro-vasculaires

Chez les animaux dotés d'une cavité gastro-vasculaire et dépourvus de système cardiovasculaire, les couches de tissus internes et externes baignent dans un liquide, ce qui facilite les échanges de gaz et de déchets cellulaires. Seules les cellules de la couche interne de la cavité ont un accès direct aux nutriments libérés par la digestion.

- ✚ Chez les éponges, les hydres et d'autres cnidaires, une enveloppe corporelle renferme une cavité gastro-vasculaire centrale, utilisée à la fois pour la digestion et pour la distribution des substances dans le corps. Le liquide présent dans la cavité communique avec l'eau du milieu externe par un orifice, et les couches cellulaires interne et externe sont en contact avec le liquide environnant.
- ✚ La cavité gastro-vasculaire des planaires et de la plupart des autres vers plats, combinée à la forme aplatie de leur corps, est bien *adaptée* à l'échange de substances avec le milieu externe. En effet, un corps aplati optimise les échanges par diffusion, car il augmente la surface disponible et réduit au minimum les distances de diffusion.

2.3.2. Les systèmes cardiovasculaires

Chez les animaux pluricellulaires, les distances de diffusion sont trop importantes pour permettre un échange efficace des nutriments et des déchets. La présence d'un système

cardiovasculaire chez ces animaux réduit au minimum la distance d'échange entre les cellules et la cellule et son environnement. On distingue différents types de système cardio-vasculaire ou de circulation :

- ✚ **Circulation ouverte** : observée chez les arthropodes et les mollusques. Ce type de circulation comporte une ou plusieurs régions musculuses qui se contractent, appelées "cœurs", et propulsent l'hémolymphe dans des vaisseaux (Fig.). Ces vaisseaux s'ouvrent dans un ensemble de lacunes qui constituent l'hémocoèle.

- ✚ **Circulation fermée** : observée chez l'ensemble des *vertébrés*. Ce type comprend un *cœur et un circuit fermé de vaisseaux* dans lesquels le sang circule. Une ou plusieurs régions contractiles, également appelées "cœurs", propulsent le sang dans les artères et les capillaires qui le répartissent dans les organes. Le sang circule sous une pression relativement élevée dans ce système (Fig.11).

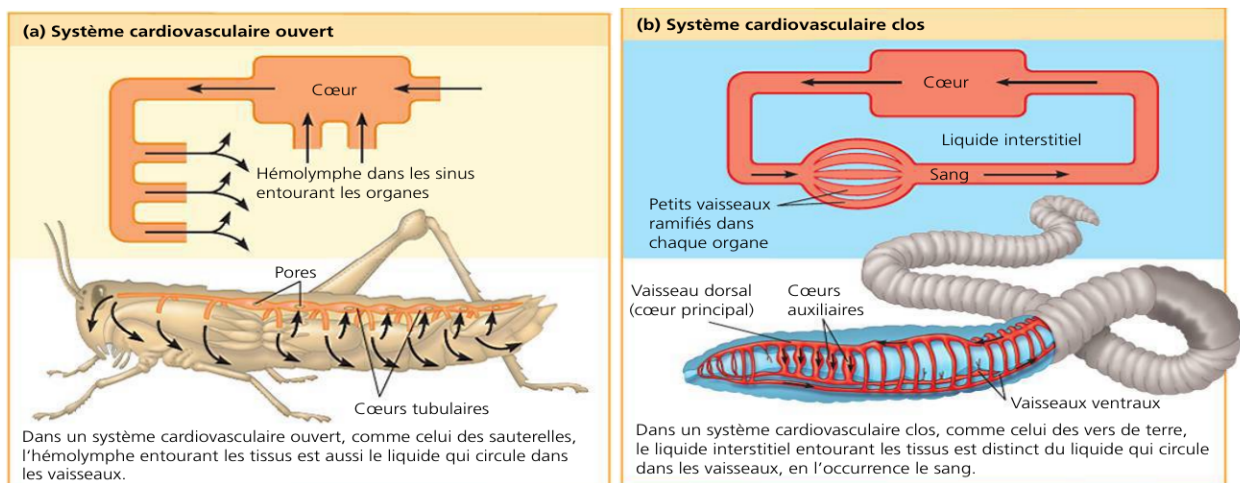


Fig.11. Circulation ouverte et circulation fermée.

2.3.3. Organisation des systèmes cardiovasculaires chez les vertébrés

Le cœur des vertébrés est constitué de cavités musculaires qui reçoivent le sang revenant au cœur, appelées oreillettes, et de cavités qui pompent le sang hors du cœur, appelées ventricules. Le nombre de cavités ainsi que la manière dont elles sont séparées varie considérablement d'un groupe de vertébrés à l'autre. Ces différences traduisent des adaptations importantes.

a. La circulation simple et la circulation double

- ✚ Chez les poissons osseux ainsi que chez les raies et les requins, le cœur est composé de deux cavités : une oreillette et un ventricule. Dans ce système de circulation simple (Fig.12), le sang passe une seule fois par le cœur au cours d'un circuit. Le sang qui entre dans le cœur s'accumule d'abord dans l'oreillette avant d'atteindre le ventricule. La contraction du ventricule propulse ensuite le sang vers les branchies, où se produit une diffusion efficace de O₂ dans le sang et de CO₂ hors du sang. Quand le sang quitte les branchies, les capillaires convergent dans un vaisseau qui achemine le sang oxygéné vers les lits capillaires de tout le corps. Une fois les échanges gazeux effectués, le sang retourne ensuite au cœur.
- ✚ Les amphibiens, les reptiles et les mammifères possèdent un système de circulation double (Fig.12), ce qui signifie qu'ils sont pourvus de deux circuits. Dans ce système, les pompes des deux circuits forment un seul organe : le cœur. Avoir deux pompes dans un seul cœur simplifie la coordination des cycles de contractions.

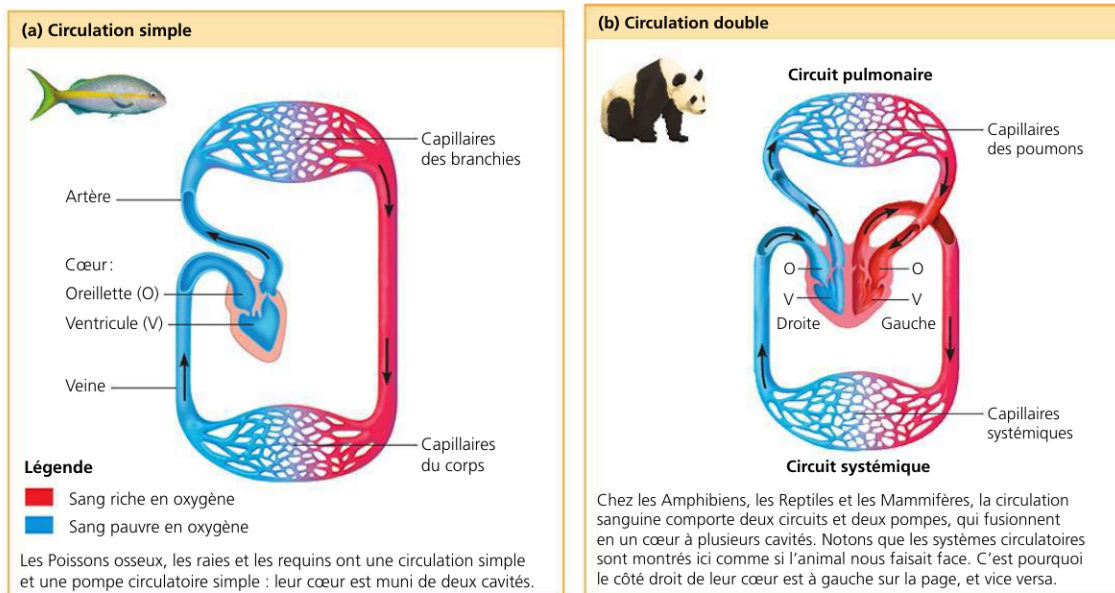
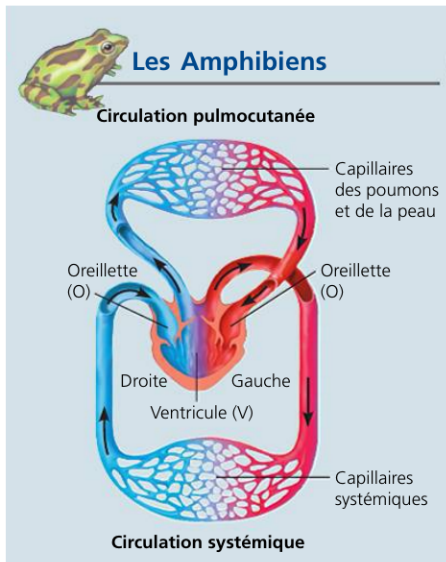


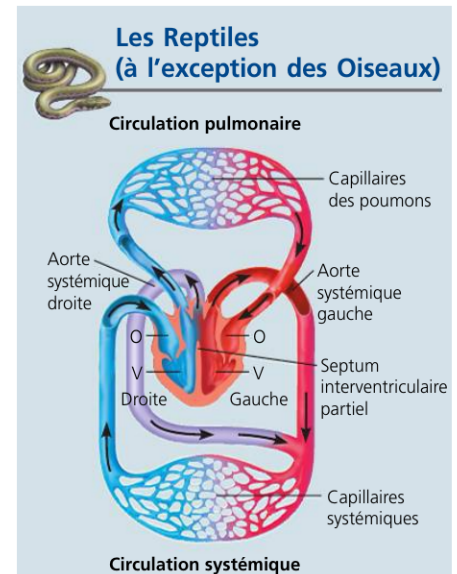
Figure 12. Circulation simple et circulation double.

Pour mieux comprendre les différentes *adaptations* qui ont émergé chez les vertébrés, la figure suivante (Fig.13) montre la circulation chez les mammifères ainsi que l'anatomie et la physiologie du cœur.

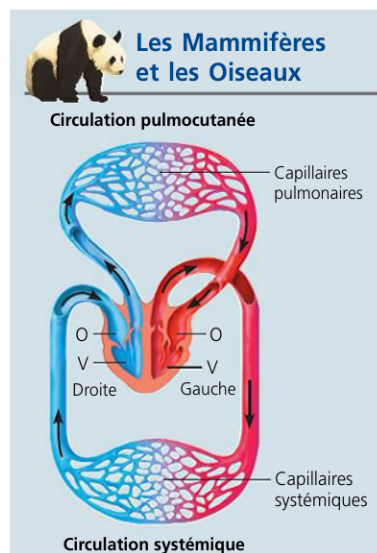


Chez les Mammifères et les Oiseaux, le cœur comporte deux oreillettes et deux ventricules complètement cloisonnés.

Les échanges importants de substances sont rendus possibles grâce à l'indépendance des circulations systémique et pulmonaire, ainsi qu'à l'intervention d'un cœur gros et puissant, capable de pomper le volume nécessaire de sang.



Les grenouilles et les autres amphibiens sont pourvus d'un cœur à trois cavités : deux oreillettes et un ventricule. Le ventricule est muni d'une crête qui dévie le sang riche en O_2 de l'oreillette gauche vers la circulation systémique et qui dévie le sang appauvri en O_2 de l'oreillette droite vers la circulation pulmo-cutanée. Lorsqu'elle est sous l'eau, la grenouille modifie sa circulation. Elle coupe l'arrivée de sang vers ses poumons temporairement non fonctionnels. Le sang poursuit sa route vers la peau, qui devient l'unique organe d'échanges gazeux pendant que la grenouille est sous l'eau.



Le cœur des tortues, des serpents et des lézards comporte trois cavités et l'unique ventricule est partiellement cloisonné en deux cavités séparées : celle de droite et celle de gauche.

Chez les alligators et d'autres Crocodiliens, les ventricules sont complètement séparés par un septum (non montré), mais la circulation pulmonaire et la circulation systémique se rejoignent là où les artères quittent le cœur. Cette communication permet aux valvules artérielles de détourner le sang de la circulation pulmonaire vers la circulation systémique.

Figure 13. La circulation chez les mammifères, l'anatomie et la physiologie du cœur.

2.4. Osmorégulation et excrétion

L'osmorégulation correspond à l'ensemble des processus physiologiques permettant de réguler le potentiel hydrique et osmotique du milieu intérieur des organismes. En termes d'équilibre hydrominéral, les animaux sont confrontés à des environnements très différents, que l'on peut classer en trois grandes catégories : le milieu marin, le milieu d'eau douce, et le milieu terrestre.

2.4.1. L'osmorégulation en milieu marin

Le milieu marin est généralement plus concentré que le milieu intérieur des organismes, et les stratégies adaptatives varient selon les différents groupes zoologiques :

a. Les invertébrés aquatiques marins

Le milieu marin est très concentré, et les stratégies adaptatives varient selon les groupes zoologiques. Les invertébrés marins sont généralement iso-osmotiques, c'est-à-dire en équilibre osmotique avec l'eau de mer. Les concentrations de leurs fluides corporels en Na^+ , K^+ , Mg^+ et Cl^- sont proches de celle de l'eau de mer dans laquelle ils vivent. Beaucoup d'entre eux sont des osmotolérants, leur osmolarité est la même que celle de l'eau de mer, ne nécessite donc pas de mécanismes osmorégulateurs particuliers. Ils n'ont donc pas de difficulté à maintenir leur équilibre hydrique. Cependant, comme la concentration de certains solutés dans leur corps diffère considérablement de celle de l'eau de mer, ils doivent compter sur le transport actif de ces solutés pour maintenir l'homéostasie.

- ✚ Par exemple, bien que la concentration des ions magnésium de l'eau de mer soit de 50 mmol/L, les mécanismes d'homéostasie du homard maintiennent une concentration de moins de 9 mmol/L d'ions magnésium dans son hémolymphe.

b. Les Vertébrés aquatiques marins

Les **vertébrés** marins et certains **invertébrés** marins sont des osmorégulateurs. Pour la plupart de ces animaux, l'océan est un environnement très déshydratant, car la composition du milieu intérieur est très hypoosmotique par rapport à l'eau de mer. Ils ont donc tendance à perdre de l'eau et à absorber des sels minéraux, ce qui les oblige à lutter à la fois contre les mouvements de l'eau et des sels. Parmi les mécanismes de lutte :

- ✚ La **morue** perd constamment de l'eau par osmose. Pour compenser ces pertes, elle boit de grandes quantités d'eau de mer. Elle utilise ses branchies et ses reins pour se débarrasser des sels. Dans les branchies, des cellules spécialisées, appelées cellules à chlorure (ou ionocytes), effectuent le transport actif des ions chlorure vers l'extérieur, tandis que les ions sodium suivent passivement. Les reins éliminent les ions excédentaires (calcium, magnésium, sulfates) tout en excréant de petites quantités d'eau.
- ✚ Les **requins**, les **Raies** et l'amphibien *Rana cancrivora* utilisent des stratégies d'osmorégulation différentes, maintenant une concentration interne en sels inférieure à celle de l'eau de mer. Ils acquièrent donc du sel par diffusion à travers leurs surfaces corporelles, en particulier au niveau des branchies. Souvent considérés comme osmotolérants, ces animaux maintiennent artificiellement une osmolarité interne élevée en retenant des composés osmotiquement actifs comme l'urée et l'oxyde de triméthylamine. Cette stratégie leur confère une iso-osmotocité qui prévient les pertes d'eau. Cependant, comme la concentration de solutés de leurs liquides corporels dépasse légèrement 1 000 mmol/L, l'eau pénètre lentement dans le corps des requins par osmose, ainsi qu'à travers leur alimentation, car ils ne boivent pas. L'eau est excrétée dans l'urine produite par les reins, en même temps qu'une partie des sels. Le reste des sels est éliminé par la glande rectale ou par les selles.

- ✚ Les *reptiles* et les *oiseaux marins*, bien qu'aériens, se nourrissent d'animaux et de végétaux marins, ce qui les expose aux mêmes risques d'excès de sels. Ces animaux possèdent des reins peu efficaces, incapables de concentrer l'urine et de produire une urine hyperosmotique par rapport à leurs fluides corporels. Ils excrètent les sels par l'intermédiaire de glandes à sels nasales ou buccales, selon les espèces. Ces glandes à sel sont contrôlées par les surrénales et le système nerveux parasymphatique.
- ✚ Les *mammifères marins*, tels que les *otaries*, les *phoques*, les *baleines* et les *morses*, sont également confrontés à un excès de sels. Bien qu'ils ne possèdent aucun organe extrarénal pour excréter le sel, leurs reins sont capables de produire une urine très hyperosmotique. Cependant, l'efficacité de ces reins reste limitée. Pour éviter l'augmentation de leur concentration en sels, ces animaux ne boivent pas l'eau de mer et se contentent de l'eau présente dans leur nourriture. De plus, certains mammifères marins peuvent récupérer l'eau métabolique, de la même manière que certains mammifères des zones désertiques.

2.4.2. L'osmorégulation en eau douce

Les contraintes osmotiques des animaux dulcicoles s'opposent généralement à celles du milieu marin. Dans leur milieu, l'osmolarité est très faible et les animaux sont en général hyperosmotiques par rapport à cet environnement. Avec une concentration en sels presque nulle et une osmolarité de leurs liquides corporels beaucoup plus élevée que celle de leur milieu, ces animaux acquièrent constamment de l'eau par osmose et perdent des sels par diffusion. Ils doivent donc faire face à une entrée d'eau causée par le gradient osmotique, ainsi qu'à une perte de sels due aux gradients de concentration des ions Na^+ et Cl^- . La quasi-totalité des animaux vivant en eau douce sont osmorégulateurs, qu'ils soient stricts ou partiels.

Chez de nombreux animaux dulcicoles, y compris les poissons osseux, la pénétration de l'eau peut être partiellement compensée de différentes manières :

- ✚ Les vertébrés excrètent l'eau excédentaire par les reins en produisant une urine très diluée. De plus, ces animaux ont un tégument relativement imperméable à l'eau et ne boivent pas, ce qui limite les entrées d'eau. Les sels perdus par diffusion et dans l'urine sont remplacés par ceux contenus dans les aliments et par transport actif au niveau :
- ✚ **Les branchies des poissons** : certains poissons dulcicoles remplacent les sels en les absorbant à travers leurs branchies. Des cellules à chlorure dans les branchies effectuent un transport actif du Cl^- vers l'intérieur, tandis que le Na^+ suit passivement.
- ✚ **La peau des amphibiens** : la perte de sels est compensée par une absorption active d'ions au niveau de la peau. L'aldostérone et l'ADH régulent cette absorption.

2.4.3. L'osmorégulation chez les espèces migratrices

Le *saumon* et l'*anguille*, qui alternent entre l'eau douce et l'eau de mer, possèdent des adaptations physiologiques leur permettant d'effectuer des changements dans la morphologie et le nombre de cellules à chlorures.

- ✚ Lorsque la **salinité du milieu est réduite**, les cellules à chlorures ne présentent pas d'invaginations.
- ✚ Lorsque la **salinité du milieu est augmentée**, on observe un accroissement du nombre de cellules à chlorures, l'apparition d'invaginations intracellulaires, ainsi que le développement d'un espace extracellulaire par la formation de replis des cellules à chlorures et une augmentation de l'activité de l'anhydrase carbonique.

Chez le *saumon*, ces changements sont contrôlés par une sécrétion accrue du **cortisol** lors du passage en eau de mer et de **prolactine** lors de l'entrée en eau douce.

2.4.4. La régulation en milieu terrestre (ou aérien)

Les animaux terrestres subissent une déshydratation permanente en raison de l'excrétion et de l'évaporation, en particulier au niveau de leur tégument et de leurs poumons. Ce problème est amplifié par le fait que l'apport d'eau provient généralement de l'alimentation. Les proportions des types de pertes varient selon les groupes zoologiques. Les diverses adaptations observées visent toujours à limiter ces pertes et à récupérer de l'eau.

- ✚ Les **insectes** minimisent les pertes d'eau grâce à une cuticule imperméable. Cette imperméabilité résulte d'une part de la structure chitineuse et d'autre part d'un revêtement cireux déposé sur la surface cuticulaire. Les tubes de Malpighi des insectes produisent une urine très concentrée, ce qui permet une économie d'eau importante.

- ✚ Les **Amphibiens**, quant à eux, ont un tégument relativement perméable à l'eau. Bien qu'ils ne boivent pas, ces animaux contrôlent leur production d'urines hors de l'eau. Ils possèdent une vessie capable d'emmagasiner une quantité significative d'eau. Plusieurs espèces réabsorbent l'eau urinaire, qui sert de réserve hydrique, sous l'action de l'ADH.

- ✚ Chez les Vertébrés, les téguments des oiseaux, des mammifères et des reptiles présentent une faible perméabilité, notamment en raison de la présence de phanères (plumes, poils, tégument corné).
 - **Les reptiles** produisent une très petite quantité d'urine très concentrée.

 - **Chez les oiseaux et les mammifères**, les reins contrôlent l'excrétion azotée et l'élimination des sels.

2.4.5. L'osmorégulation en milieu désertique

Le milieu désertique se caractérise, d'une part, par une sécheresse extrême (précipitations < 50 mm/an, végétation rare à absente) et, d'autre part, par une forte amplitude thermique journalière, avec des températures atteignant 55 à 70 °C au sol pendant la journée et autour de 0° C la nuit. Pour *s'adapter* à ces conditions extrêmes, les animaux ont développé plusieurs mécanismes physiologiques :

- ✚ Ils n'ont plus besoin de boire ;
 - ✚ Ils possèdent la capacité de concentrer l'urine grâce à des fonctions rénales modifiées et à des structures particulières dans le rein.
- ◇ Le *rat Kangourou* des déserts d'Amérique du Nord illustre parfaitement l'adaptation à l'osmorégulation en milieu désertique. Cet animal couvre ses besoins en eau grâce au peu d'eau contenu dans les graines dont il se nourrit, ainsi qu'à l'eau métabolique produite par son organisme. Cette *adaptation* repose sur :
- La capacité de ses reins à produire une urine très hypertonique par apport au plasma.
 - La perte d'eau est réduite grâce à un système à contre-courant temporel. Dans ce système, les voies nasales humidifient et réchauffent l'air pendant l'inspiration, ce qui porte la température de l'air à 38 °C et 100 % d'humidité relative au niveau de l'épithélium pulmonaire. Lors de l'expiration, les voies nasales servent d'échangeur thermique, permettant à l'animal de rejeter un air saturé en vapeur d'eau, mais plus froid que l'air pulmonaire. Le refroidissement de l'air expiré entraîne une condensation d'eau, permettant ainsi de récupérer une partie de l'eau normalement expirée.

- Les femelles produisent un lait hautement concentré, contenant seulement 50.4 % d'eau, et elles récupèrent de l'eau en consommant l'urine et les crottes de leurs jeunes.
- ◇ Le rat des sables récupère l'eau à partir d'un végétal dont les feuilles contiennent 90 % d'eau, bien que celles-ci présentent également de fortes teneurs en sel et en acide oxalique.
- ◇ D'autres rongeurs ont résolu ce problème en devenant « carnivores » et/ou insectivores. Par exemple, la souris sauterelle du Sud des déserts d'Amérique du Nord se nourrit de scarabées, de scorpions et de sauterelles riches en eau.
- ◇ De tels systèmes existent chez de nombreux mammifères, oiseaux et reptiles. Certains animaux, comme le dromadaire, sont également capables de rejeter un air non saturé en eau grâce aux propriétés hygroscopiques de leurs parois nasales.

2.4.6. Excrétion azotée

La réduction des pertes hydriques passe également par la capacité de certains animaux à excréter l'azote sous une forme peu exigeante en eau. Ainsi, la plupart des animaux terrestres excrètent l'azote sous forme d'urée (comme chez les mammifères et les amphibiens) ou sous forme d'acide urique (comme chez les reptiles, les oiseaux et les insectes). L'urée, et surtout l'acide urique, sont des substances osmotiquement moins actives que l'ammoniac.

- ✚ Les animaux aquatiques éliminent le plus souvent de l'**ammoniac**.
- ✚ L'**urée**, qui est très soluble dans l'eau, est synthétisée à partir de l'ammoniac et du CO₂. Elle est ensuite filtrée par les reins au niveau des glomérules.
- ✚ L'élimination de l'azote sous forme d'**acide urique** est courante chez les insectes, la plupart des reptiles et des oiseaux. L'acide urique est très peu soluble dans l'eau et se précipite dans une urine concentrée.

Chapitre 3.

Réponses des animaux aux variations de température du biotope et adaptations aux rythmes saisonniers

La température est un élément déterminant de la physiologie des êtres vivants, et ses effets sur les animaux sont bien connus. Les réactions enzymatiques sont influencées par la température ; les enzymes se dénaturent lorsque la température devient trop élevée.

- ✚ Un homme maintient sa température corporelle aux environs de 37 °C, quelle que soit la température extérieure, qu'il gèle ou qu'il se trouve dans un sauna.
- ✚ La vie animale devient impossible au-delà d'une température corporelle de 50 °C en raison de la thermolabilité de la plupart des enzymes.
- ✚ Au voisinage de 0 °C, le gel de l'eau cellulaire est incompatible avec la survie de nombreux animaux.

Il est difficile de définir un seuil de température comme létal, car la durée de l'exposition est très importante : une température peut être tolérée pendant quelques minutes, mais devient mortelle si l'exposition dure plusieurs heures. Les animaux se répartissent en endothermes et ectothermes :

- ✚ Les **animaux ectothermes** (invertébrés, poissons, amphibiens et reptiles) ont un métabolisme trop faible pour élever leur température corporelle au-dessus de la température ambiante. Ils tirent principalement leur chaleur de l'environnement, et leur température corporelle fluctue avec la température ambiante.
- ✚ Les **animaux endothermes** (oiseaux et mammifères) produisent suffisamment de chaleur métabolique pour maintenir leurs températures corporelles au-dessus de la température ambiante.

✚ Les **animaux hétérothermes**, selon les conditions, peuvent produire suffisamment de chaleur métabolique dans certaines situations et pas dans d'autres. Ces animaux seront alors qualifiés d'hétérothermes. L'hétérothermie se rencontre chez divers endothermes placés dans des environnements extrêmes, où il est impossible de maintenir sa température corporelle adéquate. La température corporelle peut alors diminuer ou augmenter, entraînant des réactions spécifiques chez les animaux, telles que l'hibernation, l'estivation ou la torpeur, etc.

3.1. Tolérance aux températures

Les animaux endothermes maintiennent leur température interne, quelle que soit la température du milieu, contrairement aux ectothermes. Lorsqu'un endotherme se trouve dans un environnement chaud, la thermogenèse diminue au maximum, tandis que la thermolyse augmente. Ces animaux présentent une tolérance variable aux variations de température, qui dépend à la fois de l'espèce et de la période de leur vie.

3.1.1. Tolérance aux températures élevées

Les températures tolérées varient considérablement selon les animaux. Bien que la plupart ne survivent pas au-delà de 50 °C, beaucoup d'entre elles peuvent mourir à des températures beaucoup plus basses. En revanche, un animal en diapause peut être extrêmement tolérant aux températures élevées. La plupart des animaux ne sortent que pendant les heures fraîches.

Une température est considérée comme létale lorsque 50 % de la population meurt. Les données montrent que la tolérance à une température donnée dépend du temps d'exposition : une température spécifique peut être supportée sans dommage pendant quelques minutes, mais entraîner la mort si elle persiste pendant plusieurs heures.

Les températures trop élevées conduisent à la mort en agissant sur plusieurs facteurs, les deux plus importants sont :

- ✚ **Modification des interactions protéines-lipides et lipides-lipides** : cela entraîne la destruction des membranes plasmiques, conduisant à la mort cellulaire.
- ✚ **Dénaturation des protéines (entre 45 et 50 °C)**: cela provoque l'inactivation des enzymes et bloque les processus métaboliques en raison de l'absence de produits intermédiaires.

Quelques exemples d'adaptations spécifiques des animaux aux températures élevées :

- La **fourmi argentée des sables** est active à des températures comprises entre 46.5 et 53.6 °C, mais seulement pour de courtes périodes. Elle meurt si l'exposition dépasse quelques minutes.
- Les **poissons des sources chaudes** des déserts du Nevada et de Californie ont une limite supérieure de résistance qui se situe autour de 43 °C, un record apparent.
- Les **serpents** s'enfuient dans le sable, où la température atteint 70 °C en surface, mais ne fait que 25 °C à 50 cm sous terre. Si l'on déterre la vipère à cornes, elle meurt de chaud en quelques minutes.
- Les *tortues terrestres* possèdent des pattes en forme de pelles qui leur permettent de creuser le substrat pour s'y enfouir profondément.
- La **larve d'une mouche**, trouvée au Nigéria (*Polypedilum*), supporte la déshydratation et survit à une température de 102 °C pendant une minute.
- Les **œufs d'un crustacé dulcicole** du Soudan (le *Triops*) survivent pendant tout l'hiver et le début de l'été dans de la boue sèche où la température peut dépasser 80 °C.
- **L'addax creuse deux trous** : un à l'est pour l'après-midi et un à l'ouest pour se protéger du soleil le matin. Son pelage blanc lui permet d'éviter l'échauffement en réfléchissant les radiations lumineuses.

- Le mimétisme des grenouilles arboricoles leur confère un revêtement sombre qui les protège ou un revêtement clair qui réfléchit la lumière.
- Le pelage feutré et épais du **dromadaire** sert d'isolant thermique.
- Les **coléoptères** présentent une chitine sombre qui forme une barrière aux rayons ultraviolets et absorbe les infrarouges. Cependant, de petits alvéoles dans la chitine filtrent la température extérieure et empêchent sa transmission à l'intérieur de l'organisme.
- Les grandes pattes des **Antilopes**, avec leur faible surface de contact avec le sol, minimisent les points de contact avec le substrat chaud.
- **Les lézards, les oiseaux et les mammifères** utilisent le halètement pour refroidir le corps.
- Les **écureuils du Cap** se protègent en se cachant sous leur queue placée en panache.
- **Certains rongeurs des milieux arides** entrent en torpeur pour survivre pendant la saison sèche et stockent des réserves de graisse dans leur queue. Ils présentent tous un pelage de couleur pâle pour mieux résister à la chaleur et construisent des terriers profonds (de 1 à 2 m) pour se protéger des rayons du soleil durant la journée.

3.1.2. Tolérance au froid et au gel

Certains organismes supportent un gel intense, mais ce n'est pas le cas de la plupart des animaux. Quelques animaux ectothermes tolèrent des températures très basses sans problème, tandis que d'autres meurent dès que la température s'approche de zéro.

- ✚ Les poissons des eaux chaudes meurent à 10 °C, car leur système nerveux central se refroidit, entraînant un blocage de la respiration. La mort survient en raison du refroidissement du centre respiratoire, ce qui provoque une **anoxie**.

Dans les zones tempérées et froides, les animaux passent de longues périodes dans un environnement où la température est bien inférieure à 0 °C. Pour éviter l'exposition à des températures trop basses qui pourraient solidifier leurs liquides corporels, les animaux terrestres s'enfoncent profondément dans le sol, tandis que les animaux aquatiques restent au fond de l'eau durant la période froide.

La survie des animaux dans ses conditions repose sur des caractéristiques physiologiques et biochimiques spécifiques. Deux stratégies d'adaptation sont alors possibles :

- ✚ **Animaux tolérant le gel**, ce qui leur permet de supporter le gel, de survivre à une congélation importante et d'accepter qu'une partie de leurs fluides internes soit gelée.

- ✚ **Animaux intolérant au gel** parviennent à empêcher la formation de cristaux de glace dans leurs fluides internes, même lorsqu'ils sont exposés à des températures de -40 ou -50 °C. Ces animaux meurent dès qu'un cristal de glace se forme dans leur corps.

◇ **Espèce tolérant le gel**

Les animaux gelés ne donnent aucun signe de vie : ils ne bougent plus, ne respirent plus, leur cœur ne bat pas, leur sang ne circule plus, la seule fonction qui persiste est une faible activité neurologique. Le gel tue les cellules, déchire les membranes plasmiques et détruit les organes.

D'où la question qui se pose : "**comment les animaux peuvent-ils résister au gel**"?

Il y a une condition primordiale : seuls les fluides extracellulaires peuvent être gelés ; l'hyaloplasme ne doit pas geler, car cela entrainerait la mort de la cellule. Ceci n'est possible que dans le cas où la cristallisation est lente. Ce sont les liquides extracellulaires (plasma, urine) qui gèlent en premier. Les molécules d'eau s'organisent autour des protéines plasmiques synthétisées au début de l'hiver, sous contrôle hormonal (déclenché par baisse de luminosité). Ces protéines augmentent la température de surfusion et limitent la taille des cristaux de glace.

Des animaux exposés à une température très inférieure au point de congélation de leurs liquides corporels présentent des adaptations spécifiques qui leur permettent d'éviter la congélation en augmentant la température de surfusion.

Certains animaux ont adopté des stratégies pour empêcher le gel. C'est le cas par exemple de :

- Les *reptiles* et les *amphibiens*, dont les liquides corporels pourraient geler à $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, ont pu être refroidis à $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ sans le moindre début de congélation.
- Certains insectes peuvent résister à des températures allant jusqu'à $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Dans l'Arctique, certains poissons marins vivent en état de surfusion dans de l'eau à $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ils doivent rester dans le fond de l'eau pour éviter le contact avec la glace.

◇ **Espèce s'opposant au gel**

Tout fluide aqueux gèle au-dessous de la température de solidification dès que des cristaux de glace apparaissent et grossissent. Certains animaux synthétisent des substances antigels qui peuvent empêcher la formation de cristaux de glace.

- **Les téléostéens de l'Arctique** : ces poissons ont acquis la faculté de produire un antigel (glycopeptides) très efficace qui abaisse le point de congélation de leurs fluides corporels jusqu'à $-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pendant l'hiver austral, la température de l'eau sous la couche de glace oscille entre -1.4 et $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Les grenouilles** : accumulent du glucose dans leur sang (jusqu'à 45 g/L). Lorsque leur peau commence à geler, la glace déclenche le catabolisme du glycogène du foie (réaction neuroendocrine). Cela permet à l'animal de réagir très rapidement au froid, le sucre protège les organes et le muscle cardiaque contre le froid.
- **Les arthropodes** : de nombreux arachnides ou insectes disposent de glycoprotéines antigels encore plus efficaces, leur permettant de survivre jusqu'à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cela leur

permet de conserver leur activité pendant l'hiver. De plus, certains insectes contiennent de l'éthylène-glycol dans leurs fluides, ce qui leur permet d'être actifs jusqu'à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Au laboratoire, le glycérol est utilisé pour maintenir en vie des cellules congelées.

3.2. Régulation thermique

Pour les endothermes et les ectothermes pratiquant la thermorégulation, il est essentiel de gérer l'allocation énergétique de manière à ce que la quantité de chaleur acquise équivaille à celle de la chaleur perdue. Si l'allocation thermique est déséquilibrée, un animal se réchauffera ou se refroidira. Des catégories générales d'adaptations aident les animaux à réguler leur température corporelle.

3.2.1. Échanges de chaleur entre un organisme et son environnement

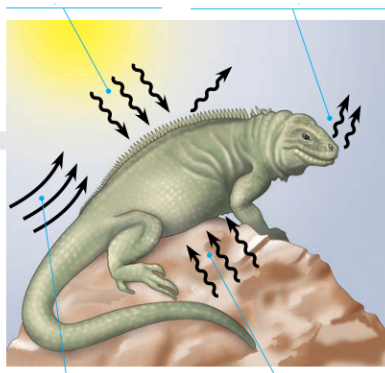
Pour maintenir la température d'un corps, il est nécessaire que la chaleur perdue soit exactement remplacée. L'équilibre de la température entre deux compartiments, dont la température est différente, s'établit soit par **conduction**, soit par **radiation**. Lorsque l'un des deux compartiments est le corps d'un animal, il convient d'ajouter l'**évaporation** (Fig.14).

- ✚ **La conduction** : il s'agit d'un contact physique qui permet le passage de chaleur du compartiment où la température est la plus élevée à celui où la température est la plus basse.
- ✚ **La convection** représente un cas particulier où, dans l'un des deux compartiments, un mouvement de masse d'un fluide (eau ou air) accélère les échanges entre le fluide et le corps qu'il contient.
- ✚ **La radiation** : ce mécanisme ne nécessite aucun contact entre les corps ayant des températures différentes.

✚ **L'évaporation** : elle se réfère à la vapeur d'eau rejetée lors de l'expiration ou du halètement, ainsi qu'à la sueur produite lors de la transpiration. Ces processus requièrent une quantité importante de chaleur.

Le **rayonnement** désigne l'émission d'ondes électromagnétiques par tous les objets dont la température est supérieure au zéro absolu. Il peut transférer de la chaleur entre des objets qui ne sont pas en contact direct; c'est le cas, par exemple, lorsqu'un lézard absorbe de la chaleur irradiée par le Soleil.

La **convection** est le processus par lequel l'air ou un liquide qui se réchauffe à la surface d'un corps se dilate et tend à s'éloigner de ce corps, faisant place à l'air ou au liquide plus froid. Par exemple, le vent facilite la déperdition thermique par convection à la surface d'un lézard ayant une peau sèche; le sang en circulation déplace la chaleur de l'intérieur du corps pour la transférer par convection aux extrémités plus froides. La convection, chez les Animaux, contribue plus souvent à une perte de chaleur qu'à un gain.



La **vaporisation** désigne le retrait de chaleur à la surface d'un liquide, qui perd certaines de ses molécules du fait de leur passage à l'état gazeux. La vaporisation de l'eau à la surface humide d'un lézard a un effet de refroidissement important.

La **conduction** désigne le transfert direct de chaleur entre les molécules de deux corps en contact ou celles de deux parties d'un même corps; par exemple quand un lézard se tient sur une roche préalablement chauffée au soleil.

Figure 14. Échanges de chaleur entre un organisme et son environnement.

3.2.2. Régulation thermique chez les endothermes

a. Réponse au froid : les animaux doivent se protéger des pertes caloriques et les compenser par une augmentation de la production de chaleur métabolique. Un animal **endotherme** doit produire une chaleur métabolique exactement égale à la chaleur qu'il perd, ce qui constitue la balance thermique.

✚ **Augmentation de la thermogénèse** : l'accroissement du métabolisme augmente la thermogénèse et peut donc être un moyen de lutte contre le refroidissement. On peut d'abord observer une augmentation volontaire de l'activité musculaire. Lorsque ces mécanismes ne parviennent pas à maintenir la température corporelle à un niveau suffisant, l'augmentation de l'activité métabolique se fait par l'oxydation des lipides stockés par l'animal avant la saison froide, que ce soit dans la couche sous-cutanée ou sous forme de graisse brune, lorsque celle-ci est présente. Ce mécanisme est déclenché par le choc thermique, qui provoque la libération d'adrénaline.

✚ **Augmentation de l'isolation thermique** : l'isolation grâce aux *poils*, aux *plumes* et aux *couches de graisse* constitue une importante adaptation thermorégulatrice chez les mammifères et les oiseaux. La quasi-totalité des mammifères et des oiseaux est isolée par des poils ou des plumes. Les propriétés isolantes de ces phanères sont liées à leur capacité à emprisonner l'air.

- Les oiseaux marins possèdent un plumage hydrophobe très dense qui conserve ses propriétés isolantes même en immersion.
- Les mammifères aquatiques sont isolés par une importante couche de tissu adipeux sous-cutané. La température de leur peau est proche de celle de l'eau, mais leur couche de gras isolante est si efficace qu'ils maintiennent une température corporelle de 36 à 38 °C, et leur métabolisme est comparable à celui des mammifères terrestres de taille équivalente.
- Les mammifères qui ont un mode de vie amphibie (ours polaires, pinnipèdes, etc.) cumulent les deux types d'isolations.

✚ **Les adaptations circulatoires** : une autre manière de limiter temporairement les pertes caloriques est la réduction de la quantité de sang circulant immédiatement sous l'épiderme, par une vasoconstriction des capillaires sous-cutanés. La vasoconstriction réduit l'apport sanguin et le transfert thermique en diminuant le diamètre des vaisseaux superficiels, tandis que la vasodilatation est déclenchée par des influx nerveux produisant un relâchement des muscles de la paroi des vaisseaux. Chez *les endothermes*, la vasodilatation réchauffe généralement la peau, ce qui augmente le transfert de la chaleur du corps à un environnement frais.

✚ **Une autre adaptation du système cardiovasculaire** est la disposition spéciale des vaisseaux sanguins. Un certain nombre d'oiseaux et de mammifères des régions polaires possèdent des dispositifs anatomiques au niveau de l'appareil circulatoire des membres, qui leur permettent de limiter les pertes caloriques. Le sang artériel est plus chaud que le sang veineux. Dans les pattes des oiseaux, une artère centrale unique est entourée de nombreux veinules ; de ce fait, la température tend à s'équilibrer entre le

sang artériel et le sang veineux ; ainsi, le sang artériel qui arrive dans les capillaires sous-cutanés a été refroidi et perd donc moins de chaleur au profit du milieu extérieur.

b. Régulation en atmosphère chaude : au-dessus de la température critique, la thermogénèse métabolique ne peut plus diminuer. Elle a atteint un niveau minimum en dessous duquel elle ne peut plus être réduite ; par conséquent, la chaleur doit être perdue au rythme où elle est produite. Lorsque la température ambiante est égale ou supérieure à la température interne, l'animal ne peut plus perdre de chaleur par conduction de son environnement. Dans ce cas, il doit adopter un moyen de réduire sa température interne.

✚ **Évaporation et transpiration** : l'évaporation reste le seul moyen de rejeter des calories, constituant l'unique façon d'éviter qu'un animal voit sa température corporelle augmenter rapidement. Les animaux terrestres perdent de l'eau par vaporisation à travers la peau et par la respiration. L'eau absorbe une quantité considérable de chaleur lorsqu'elle se vaporise. De plus, l'eau de la sueur nécessite plus d'énergie pour s'évaporer que l'eau pure, en raison des sels dissous qu'elle contient. Certains animaux possèdent des adaptations qui peuvent augmenter sensiblement l'effet de refroidissement.

- Le **halètement** joue un rôle important *chez les oiseaux et chez de nombreux mammifères* (ex. Chien).
- Certains oiseaux sont pourvus d'un sac spécialisé, très vascularisé, dans le plancher de leur cavité buccale ; le gonflement et le dégonflement rapide de ce sac favorisent la vaporisation.
- Les pigeons ont suffisamment d'eau pour faire appel au refroidissement par vaporisation, leur permettant de conserver une température corporelle proche de 40 °C dans un milieu où la température de l'air atteint jusqu'à 60 °C.
- Transpirer ou s'asperger d'eau mouille la peau et augmente le refroidissement par vaporisation.

3.3. Adaptations comportementales

Une adaptation comportementale concerne le comportement d'un animal et n'est pas visible sur son corps. Les endothermes et les ectothermes adoptent des comportements appropriés pour réguler leur température corporelle. Beaucoup d'entre eux maintiennent une température corporelle extrêmement constante grâce à des comportements simples.

- ✚ **Le fait de vivre en meute** (groupes organisés) chez le loup constitue une adaptation comportementale.

- ✚ **Dans le désert**, certains animaux restent à l'ombre et se cachent dans le sable pour éviter l'exposition du soleil, comme le scorpion et le fennec.

- ✚ **La migration** vers un climat plus propice constitue une adaptation comportementale clé à des conditions de température extrêmes. Parmi les animaux migrateurs, on retrouve les oiseaux, les mammifères, les insectes et les poissons.

- ✚ **L'hivernation et l'hibernation** : les animaux qui hivernent adoptent des comportements leur permettant de se mettre à l'abri durant l'hiver. Si le temps devient doux, l'animal peut se réveiller et faire quelques pas à l'extérieur de son abri avant d'y retourner (comme l'écureuil, le cerf et l'ours noir). Les animaux qui hibernent, quant à eux, entrent dans un état d'engourdissement dû à une baisse de leur température corporelle, dans lequel certains animaux passent l'hiver (comme la grenouille et la marmotte commune). Cette adaptation permet de réduire les besoins durant une saison pauvre en ressources alimentaires.

- ✚ **Les amphibiens** perdent rapidement de la chaleur par vaporisation des surfaces corporelles humidifiées. Ils ont donc du mal à conserver une température corporelle suffisamment élevée. Toutefois, en se déplaçant vers un endroit exposé au soleil pour se réchauffer, ils pallient ce problème. Inversement, lorsque le milieu est trop chaud, ils cherchent des microenvironnements plus frais, comme des zones ombragées.

- ✚ Les **reptiles (lézards et serpents)** maintiennent une gamme très étroite de températures corporelles pendant la journée en se déplaçant des zones fraîches aux zones chaudes, et vice versa. Quand ils ont froid, ils cherchent des endroits chauds pour augmenter leur apport thermique. Ils prennent une position qui leur permet d'exposer la plus grande partie de leur surface corporelle à la source de chaleur. Lorsque la température est trop élevée, ils se retirent dans des zones plus fraîches réduisant leur surface exposée à la source de chaleur. Certaines espèces vivant dans le désert s'enfouissent même dans le sable pendant le jour pour se protéger de la chaleur et sortent la nuit pour se nourrir.
- ✚ **Les abeilles domestiques** : leur comportement social contribue à la thermorégulation. Lorsqu'il fait froid, elles augmentent leur production de chaleur et s'entassent les unes sur les autres pour mieux la conserver. Quand il fait chaud, les abeilles régulent également la température de la ruche en y transportant de l'eau et en battant des ailes pour faciliter la vaporisation et la convection.
- ✚ **Le criquet pèlerin** doit atteindre une certaine température pour pouvoir prendre son envol. Pendant les jours froids, il se positionne de manière à optimiser l'absorption des rayons solaires.

Références Bibliographiques.

- Bayard J. (2022). Les modes de locomotion des animaux. <https://www.biodiversiteenmouvement.com/post/les-modes-de-locomotion-des-animaux>
- Boileau A. (1981). Diversité, Adaptation. Ed. Etudes Vivantes Ltée Quebec. 168p.
- Cornec J-P. & Gilles A. (2006). Biologie et Physiologie animale et cellulaire. Préparation aux épreuves orales des concours de l'enseignement. Ed. Ellipses. 457p.
- Corsin J. (1999). Biologie animale. Structure et fonction. Ed ellipse, Paris, 108p.
- Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité : FRB (2015). Prospective de recherche. Réponses et Adaptations aux changements globaux. Quels enjeux pour la recherche sur la biodiversité. 74p.
- Jane R., Urry L., Cain M., Wasserman, S., Minorsky P. & Jackson R. (2012). Campbell Biologie. Ed Pearson. 1611p.
- Nowac J. Fiche comportementale. Le mimétisme chez les animaux. entomologic.jimdo.com
- Raven P.H., Johnson G.B., Mason K., Losos J., Singer S. (2014). Biologie. Edition 3, De Boeck. French edition copyright. 1256p.
- Richard D., Anselme B., Baehr J-C., Chaffard J., Méreaux J., Périlleux E., Valet P. (1998). Physiologie Animale. Construction de l'organisme homéostasie et fonctions de relations. T2. Ed. Nathan. 352P.
- Richard D., Giraud N., Paradere F., Chevalet P., Soubaya T. (2010). Biologie Licence, tous le cous en fiche. Edition Dunod, Paris, 697p.
- Rieutort M. (1999). Physiologie animale. Les grandes fonctions. Ed. N°2 Masson. 322P.
- Schmidt-Nielsen K. (1998). Physiologie animale. Adaptations et milieux de vie.2^e cycle. Capes. Agrgation. Ed. Dunod. Paris. 611P.
- Simonet G., (2009). Le concept d'adaptation : polysémie interdisciplinaire et implication pour les changements climatiques. Natures Sciences Sociétés, 17: 392-401.

Sites Internet consultés:

- S19 L'adaptation des êtres vivants à leur environnement. http://blogs.ac-amiens.fr/weissblog/public/S19_L_adaptation_des_etres_vivants_a_leur_environnement.pdf
- Les déplacements. Les supports du mouvement. <https://www.studocu.com/fr/document/universite-de-picardie-jules-verne/sciences-du-comportement-animal/deplacement-animal-svt-cours-de-science/9161225>
- Document enseignant. Livret pédagogique. La locomotion chez les animaux marins. SAEML cité de la Mer, Cherbourg-Octeville. <http://www.citedelamer.com>.
- Boîte à Science. Sur la piste de la vie : adaptation 2015.