

I. Ecophysiologie animale

1 - La nutrition chez les animaux

Tout animal a besoin d'un régime alimentaire adéquat sur le plan nutritionnel pour pouvoir maintenir l'homéostasie, c'est-à-dire l'équilibre interne, en dépit des changements du milieu externe. Un régime alimentaire équilibré fournit l'énergie nécessaire au travail cellulaire, ainsi que tous les matériaux dont le corps a besoin pour bâtir ses propres molécules organiques.

1.1- Les besoins nutritionnels

Un régime alimentaire adéquat sur le plan nutritionnel répond à trois types de besoins :

- ▶ les besoins en énergie (chimique) pour effectuer tout le travail cellulaire ;
- ▶ les besoins en molécules organiques destinées à la biosynthèse (soit de squelettes carbonés pour la fabrication des molécules spécifiques à l'organisme);
- ▶ les besoins en nutriments essentiels, c'est-à-dire que les animaux ne sont pas en mesure de fabriquer eux-mêmes à partir de la matière ingérée et qu'ils doivent obtenir directement des aliments.

Les nutriments sont des composés simples, c'est la partie assimilable des aliments. Le nutriment en terme général est toutes les substances utilisées par l'organisme dans le but de maintenir son bon fonctionnement.

On peut classer les nutriments en fonction des quantités trouvées dans l'organisme :

- Macronutriments : Lipides, Glucides, Protides, eau
- Micronutriments : minéraux, vitamines

Les macronutriments vont être digérés puis absorbés pour donner au final les nutriments cellulaires : oses, acides gras et acides aminés.

1.2- Régimes alimentaires et types d'ingestion

1.2.1 - Régimes alimentaires

Partageant le besoin fondamental de se procurer de la nourriture, les animaux diffèrent par leur mode d'alimentation. Tous les animaux consomment d'autres organismes, que ceux-ci soient morts ou vivants, entiers ou fragmentés. (Il faut élargir la définition de « fragmentés » de sorte à tenir compte de parasites, comme certains vers plats, qui absorbent directement de l'hôte animal des molécules organiques issues de la digestion). En général, les animaux se classent en trois catégories selon leur régime alimentaire :

Les **herbivores** tels que les bovins, les concombres de mer et les termites, se nourrissent principalement de plantes ou d'algues.

Les **carnivores**, notamment les requins, les buses et les araignées, dévorent d'autres animaux.

Les **omnivores** (du latin omni, qui signifie « tout ») ne mangent pas réellement tous ce qu'ils trouvent, mais leur régime alimentaire est très varié puisqu'il se compose d'animaux aussi bien que de végétaux. Les omnivores comprennent les cafards les corbeaux, les ours et les humains qui ont évolués en chasseurs, en cueilleurs et en détritivores.

Les termes *herbivore*, *carnivore* et omnivore correspondent aux types d'aliments généralement consommés, ainsi qu'aux adaptations permettant aux animaux de se procurer de la nourriture et de la digérer. En réalité, la plupart des animaux se nourrissent de manière opportuniste ; ils consomment des aliments qui ne relèvent pas de leur catégorie alimentaire principale quand ces derniers sont disponibles. Par exemple, les Bovidés et les Cervidés, des herbivores, consomment à l'occasion de petits animaux ou des œufs d'oiseaux, en plus d'herbes et d'autres plantes. La plupart

des carnivores se procurent certains éléments nutritifs à partir de matières végétales restant dans le tube digestif des proies absorbées. Notons que tous les animaux consomment des microorganismes quand ils ingèrent des aliments.

1.2.2 - Types d'ingestion

Les différentes modalités d'ingestion des aliments relèvent de quatre grands types:

► l'ingestion par filtration, ► l'ingestion du substrat, ► l'ingestion par aspiration ► l'ingestion en vrac.

L'ingestion par filtration

De nombreux animaux aquatiques se nourrissent de matières en suspension (*suspensivores*), c'est-à-dire qu'ils filtrent les particules d'aliments contenues dans l'eau. Les Palourdes et les Huitres, par exemple, se servent de leurs branchies pour retenir des particules nutritives, que des cils vibratiles propulsent ensuite, en même temps qu'une pellicule de mucus, vers leur bouche. Les Cétacés à fanons, les plus gros animaux du monde, se nourrissent aussi de particules en suspension. Ces baleines nagent la bouche ouverte ingérant des millions de petits animaux filtrés à partir de l'énorme quantité d'eau poussée à travers leurs fanons (des lames cornées fixées à leur mâchoire supérieure).

L'ingestion du substrat

Les animaux vivent sur leur source de nourriture ou à l'intérieur de celle-ci, se frayant un chemin en mangeant. La chenille processionnaire du chêne, la larve d'un papillon de nuit (*Thaumetopoea processionea*), se fraye un chemin en mangeant le tissu mou d'une feuille de chêne et en laissant une trainée de matières fécales noirâtres sur son passage. Les vers de terre (*Lumbricus sp.*) font également partie de cette catégorie, à la différence qu'ils se frayent un chemin en mangeant de la terre. Ils récupèrent ainsi des débris, c'est-à-dire des matières organiques partiellement décomposées, qu'ils ingèrent en même temps que la terre (*saprophages*).

L'ingestion par aspiration

Les espèces tirent des liquides riches en nutriments d'un hôte vivant. Ainsi, les moustiques et les sangsues s'alimentent en absorbant le sang d'autres animaux. Les pucerons puisent la sève élaborée du phloème de Végétaux. Contrairement à ces parasites qui nuisent à leurs hôtes, d'autres espèces qui utilisent l'ingestion par aspiration rendent service à ces derniers. Par exemple, les colibris et abeilles transportent du pollen quand ils visitent les fleurs à la recherche du nectar.

L'ingestion en vrac

La plupart des animaux, notamment les Humains, se nourrissent par ingestion en vrac. Ils consomment des morceaux relativement gros de nourriture, voire des proies entières. Différentes parties anatomiques sont utilisées pour tuer les proies, déchirer la chair ou arracher des matières végétales : des tentacules, des pinces, des griffes, des crochets venimeux, des mâchoires et des dents.

1.3- Traitement de la nourriture

1.3.1- Etapes du traitement de la nourriture

Les quatre étapes principales du traitement la nourriture sont : ► l'ingestion, ► la digestion, ► l'absorption, ► l'élimination.

L'ingestion

L'ingestion constitue la première étape du traitement des aliments. Presque tous les animaux, y compris de nombreux consommateurs de nourriture liquide, doivent s'accommoder d'aliments présentés en vrac, sous forme d'ensembles extrêmement complexes de molécules. Les animaux ne peuvent utiliser ces macromolécules directement, et ce, pour deux raisons :

— Les polymères sont trop gros pour passer à travers les membranes et pénétrer dans les cellules des animaux.

— Les macromolécules qui constituent un animal ne sont pas semblables à celles qui composent les aliments. Cependant, tous les organismes utilisent des monomères communs pour fabriquer des macromolécules. Par exemple, le soja, les drosophiles et l'homme assemblent leurs protéines à partir des mêmes 20 acides aminés.

La digestion

La digestion constitue la deuxième étape du traitement de la nourriture. Elle consiste à décomposer les aliments en des molécules suffisamment petites pour être absorbées par le corps. Elle comporte deux volets :

— la digestion mécanique, qui est la fragmentation de la nourriture, et — la digestion chimique, qui est la transformation des macromolécules contenues dans les fragments de nourriture en des monomères. Les animaux sont alors capables d'utiliser ceux-ci pour assembler leurs propres molécules ou de s'en servir comme source d'énergie pour la production d'ATP.

La digestion des macromolécules rompt chaque liaison en ajoutant une molécule d'eau à l'aide d'enzymes spécifiques. Ce processus de décomposition des macromolécules s'appelle **hydrolyse enzymatique**. Certaines variétés d'enzymes hydrolytiques catalysent la digestion de chacune des catégories de macromolécules trouvées dans les aliments. Cette décomposition chimique est généralement précédée d'une fragmentation mécanique des aliments, au moyen de la mastication par exemple. Un aliment fragmenté en des morceaux plus petits a une plus grande surface exposée aux sucs digestifs contenant les enzymes hydrolytiques.

Les deux dernières étapes du traitement de la nourriture surviennent après la digestion. Au cours de **l'absorption**, les cellules constituant la paroi de la cavité digestive d'un animal permettent aux petites molécules et aux monomères présents dans cette cavité de traverser leur membrane plasmique. Lors de **l'élimination**, les matières qui n'ont pas subi de digestion ni d'absorption quittent l'organisme.

1.3.2- Les compartiments de la digestion

La plupart des animaux réduisent les risques d'autodigestion en traitant les aliments dans des compartiments spécialisés.

Digestion intracellulaire

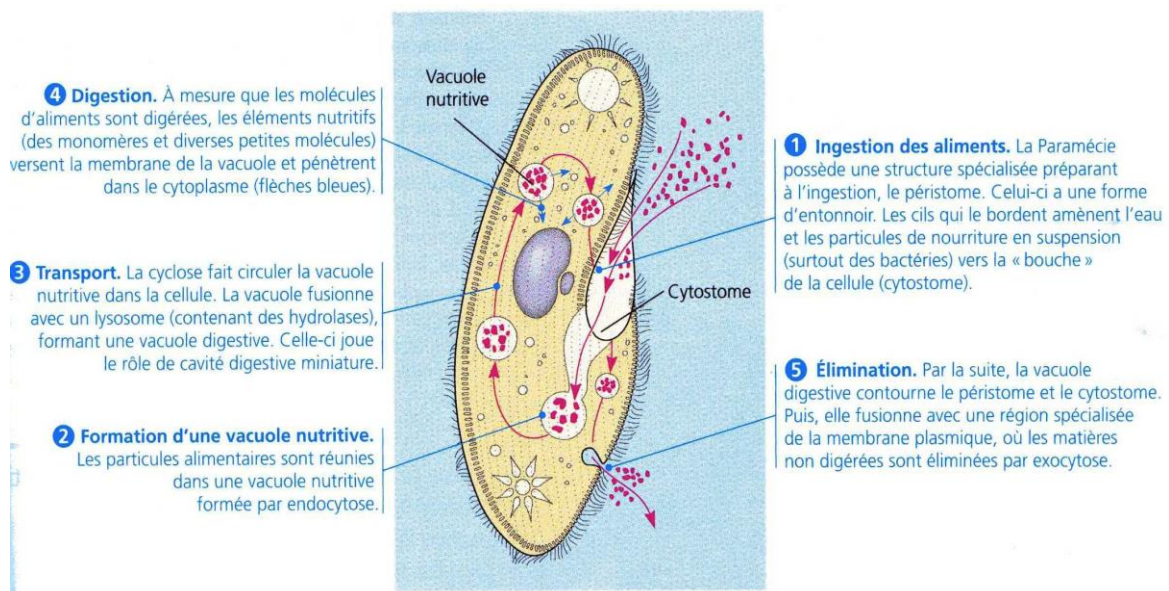


Figure 1 : Digestion intracellulaire chez la Paramecie

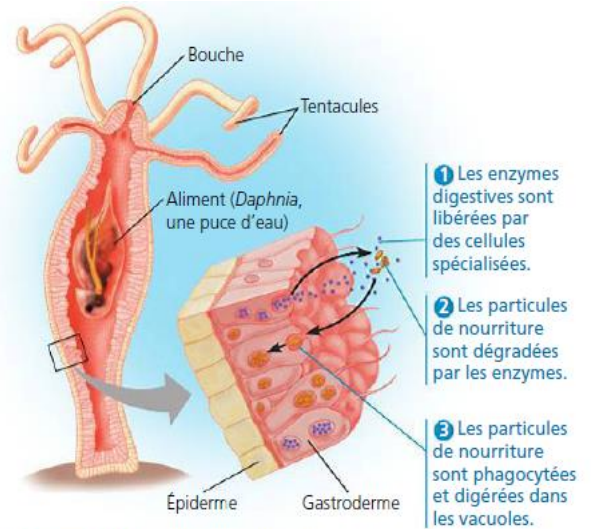
Les vacuoles digestives sont des organites servant à décomposer les aliments sans que les enzymes hydrolytiques qu'elles contiennent dégradent le cytoplasme de la cellule. Il s'agit de la sorte de cavité digestive la plus simple. Les Protistes hétérotrophes digèrent leur nourriture dans des vacuoles digestives, habituellement après avoir incorporé les aliments par phagocytose ou par pinocytose. Les vacuoles digestives nouvellement formées fusionnent avec des lysosomes, des organites contenant des enzymes hydrolytiques. Les aliments sont donc en contact avec les enzymes.

La digestion peut se dérouler en toute sécurité dans une cavité délimitée par une membrane protectrice. Ce phénomène est appelé digestion intracellulaire (fig. 1).

Digestion extracellulaire

Chez la plupart des animaux, au moins une partie de l'hydrolyse s'effectue au cours d'une digestion extracellulaire. La digestion extracellulaire a lieu dans des compartiments communiquant avec l'extérieur du corps des animaux.

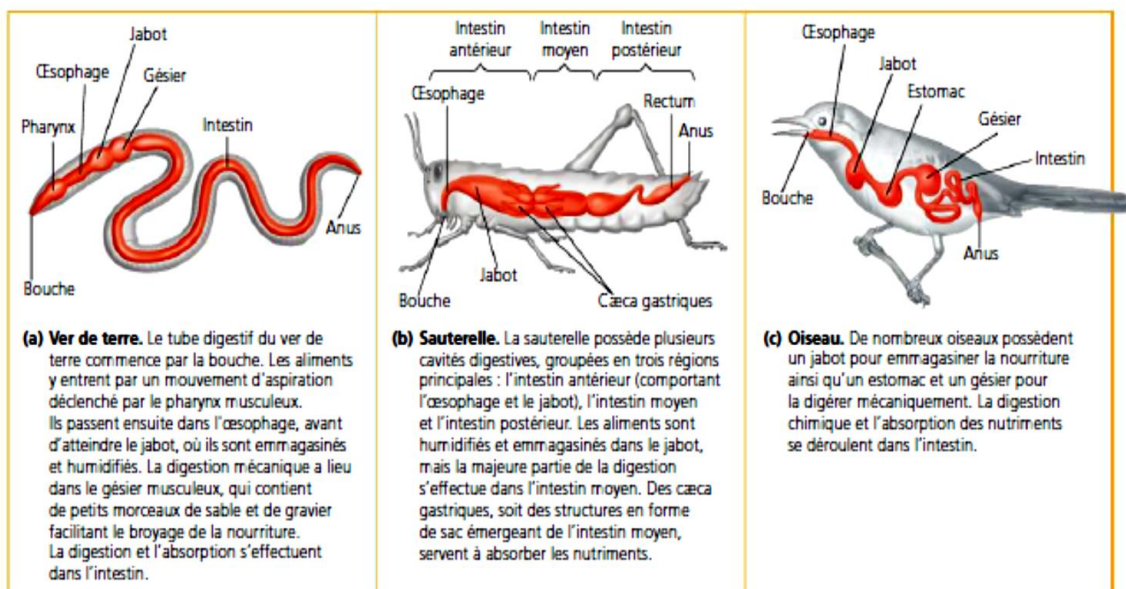
De nombreux animaux caractérisés par un plan d'organisation corporelle simple possèdent une cavité digestive à une seule ouverture. Cette structure en forme de sac, appelée cavité gastrovasculaire, sert à la fois à la digestion des nutriments et à leur circulation dans tout l'organisme (d'où le qualificatif *vasculaire*). L'Hydre (*Hydra sp.*), un Cnidaire, illustre bien le fonctionnement de la cavité gastrovasculaire (fig. 2).



▲ Figure La digestion chez l'hydre. La digestion commence dans la cavité gastrovasculaire. Elle se poursuit dans les cellules gastrodermiques, une fois que les petites particules d'aliments y sont entrées par phagocytose.

Figure 2 : Digestion extracellulaire dans une cavité gastrovasculaire (chez l'hydre)

Contrairement aux Cnidaires et aux Plathelminthes (vers plats), la plupart des animaux (y compris les Nématodes, les Annélides, les Mollusques, les Arthropodes, les Échinodermes et les Cordés) possèdent une succession de compartiments reliant deux ouvertures: la bouche et l'anus. Cet ensemble s'appelle *tube digestif, tractus digestif ou canal alimentaire*. Comme la nourriture s'y déplace dans une seule direction, le tube digestif peut comprendre plusieurs compartiments spécialisés effectuant la digestion et l'absorption des nutriments par étapes (fig. 3). Les aliments ingérés par la bouche et le pharynx passent par l'œsophage, qui conduit au jabot, au gésier ou à l'estomac, selon l'espèce. Le jabot et l'estomac servent généralement à emmagasiner temporairement les aliments (même si une partie de la digestion peut s'y dérouler) ; le gésier, lui, broie et fragmente ces derniers. La nourriture entre ensuite dans un intestin (plus ou moins compartimenté, suivant les espèces) ; là, les molécules de nourriture sont hydrolysées par des enzymes digestives. Les nutriments sont absorbés par la paroi du tube digestif et se rendent jusqu'au sang. Les résidus indigestibles sont éliminés par l'anus.



(a) Ver de terre. Le tube digestif du ver de terre commence par la bouche. Les aliments y entrent par un mouvement d'aspiration déclenché par le pharynx musculueux. Ils passent ensuite dans l'œsophage, avant d'atteindre le jabot, où ils sont emmagasinés et humidifiés. La digestion mécanique a lieu dans le gésier musculueux, qui contient de petits morceaux de sable et de gravier facilitant le broyage de la nourriture. La digestion et l'absorption s'effectuent dans l'intestin.

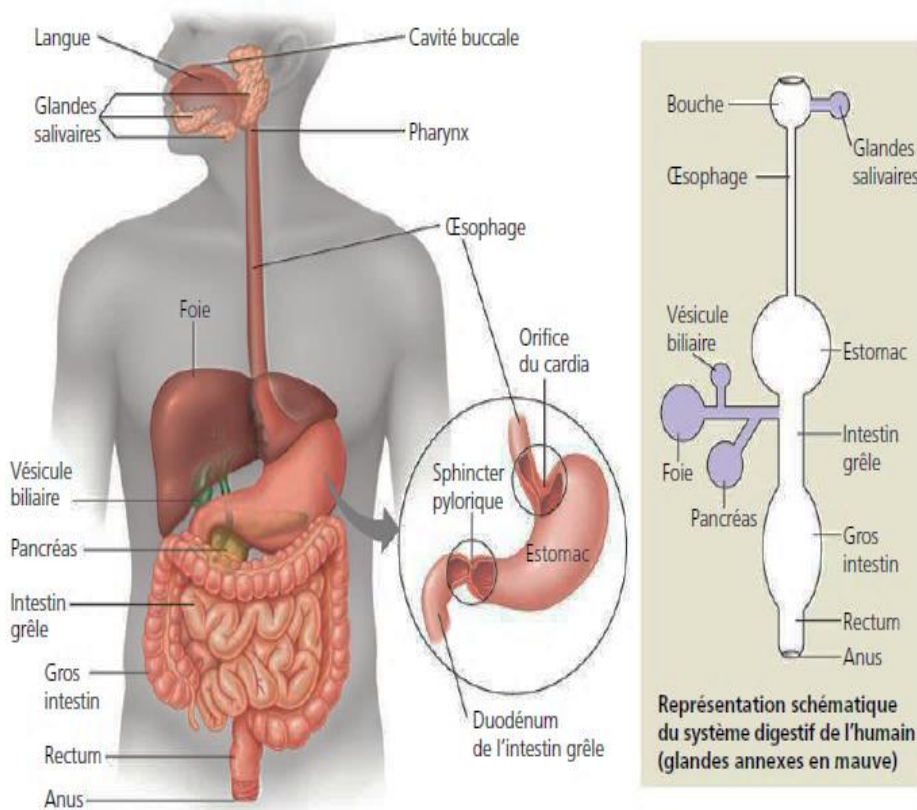
(b) Sauterelle. La sauterelle possède plusieurs cavités digestives, groupées en trois régions principales : l'intestin antérieur (comportant l'œsophage et le jabot), l'intestin moyen et l'intestin postérieur. Les aliments sont humidifiés et emmagasinés dans le jabot, mais la majeure partie de la digestion s'effectue dans l'intestin moyen. Des caeca gastriques, soit des structures en forme de sac émergeant de l'intestin moyen, servent à absorber les nutriments.

(c) Oiseau. De nombreux oiseaux possèdent un jabot pour emmagasiner la nourriture ainsi qu'un estomac et un gésier pour la digérer mécaniquement. La digestion chimique et l'absorption des nutriments se déroulent dans l'intestin.

Figure 3 : Différents tubes digestifs chez les animaux

1.3.3- Le système digestif des mammifères

Chez les mammifères, le système digestif se compose d'un tube auquel sont raccordés divers organes annexes et glandes. Certaines de ces glandes déversent des sucs digestifs dans le tube par l'intermédiaire de conduits (fig. 4). Les organes annexes du système digestif mammalien sont les trois paires de glandes salivaires, le pancréas, le foie et la vésicule biliaire.



◀ **Figure 4** Le système digestif de l'humain. Après la mastication et la déglutition des aliments, il faut à peine de 5 à 10 s pour qu'ils parcourent l'œsophage et entrent dans l'estomac. Ils y restent de 2 à 6 h et sont partiellement digérés. La majeure partie de la digestion et de l'absorption des nutriments se produit dans l'intestin grêle; elle dure de 5 à 6 h. En 12 à 24 h, tous les résidus de la digestion passent par le gros intestin et les matières fécales sont expulsées par l'anus.

Les aliments avancent dans le canal alimentaire grâce au péristaltisme, c'est-à-dire un mouvement produit par une succession de contractions rythmiques résultant de l'action des muscles lisses de la paroi du tube digestif. À certains points de jonction des segments spécialisés du tube digestif, la couche musculaire forme un anneau appelé sphincter (ou muscle sphincter). Celui-ci ferme le tube à la manière d'un nœud coulant et régule le passage des aliments d'un compartiment à l'autre.

C'est dans la cavité buccale que la transformation des aliments commence; ceux-ci sont ensuite acheminés vers l'estomac par le pharynx et l'œsophage. Les aliments sont lubrifiés et leur digestion commence dans la cavité buccale, où ils sont mâchés par les dents et fragmentés en des particules exposées à de l'amylase salivaire. Cette enzyme entame la décomposition des polysaccharides. De plus, la muqueuse buccale ajoute aux aliments une lipase linguale qui s'attaque aux lipides. Cependant, cela survient surtout dans l'estomac. L'œsophage amène les aliments du pharynx à l'estomac grâce au mouvement de muscles involontaires produisant des ondes péristaltiques.

Les aliments séjournent dans l'estomac, site d'une digestion préliminaire et de l'absorption de certaines substances. L'estomac emmagasine les aliments et sécrète du suc gastrique, qui convertit le repas en un chyme acide. Le suc gastrique comprend du chlorure d'hydrogène ainsi que les enzymes pepsine et lipase gastrique. L'estomac absorbe certaines quantités de molécules neutres, de courts acides gras, d'alcool, d'électrolytes et d'eau.

L'intestin grêle joue un rôle majeur dans la digestion et l'absorption. Le chyme acide de l'estomac atteint le duodénum et se mélange avec le suc intestinal, la bile et le suc pancréatique. Diverses enzymes complètent

l'hydrolyse des molécules alimentaires et les transforment en des monomères. Ces derniers sont ensuite absorbés dans le sang en passant à travers la muqueuse de l'intestin grêle. Le foie est un organe important, aux fonctions multiples. Entre autres choses, il produit la bile, qui intervient mécaniquement dans la digestion des graisses (fig. 5).

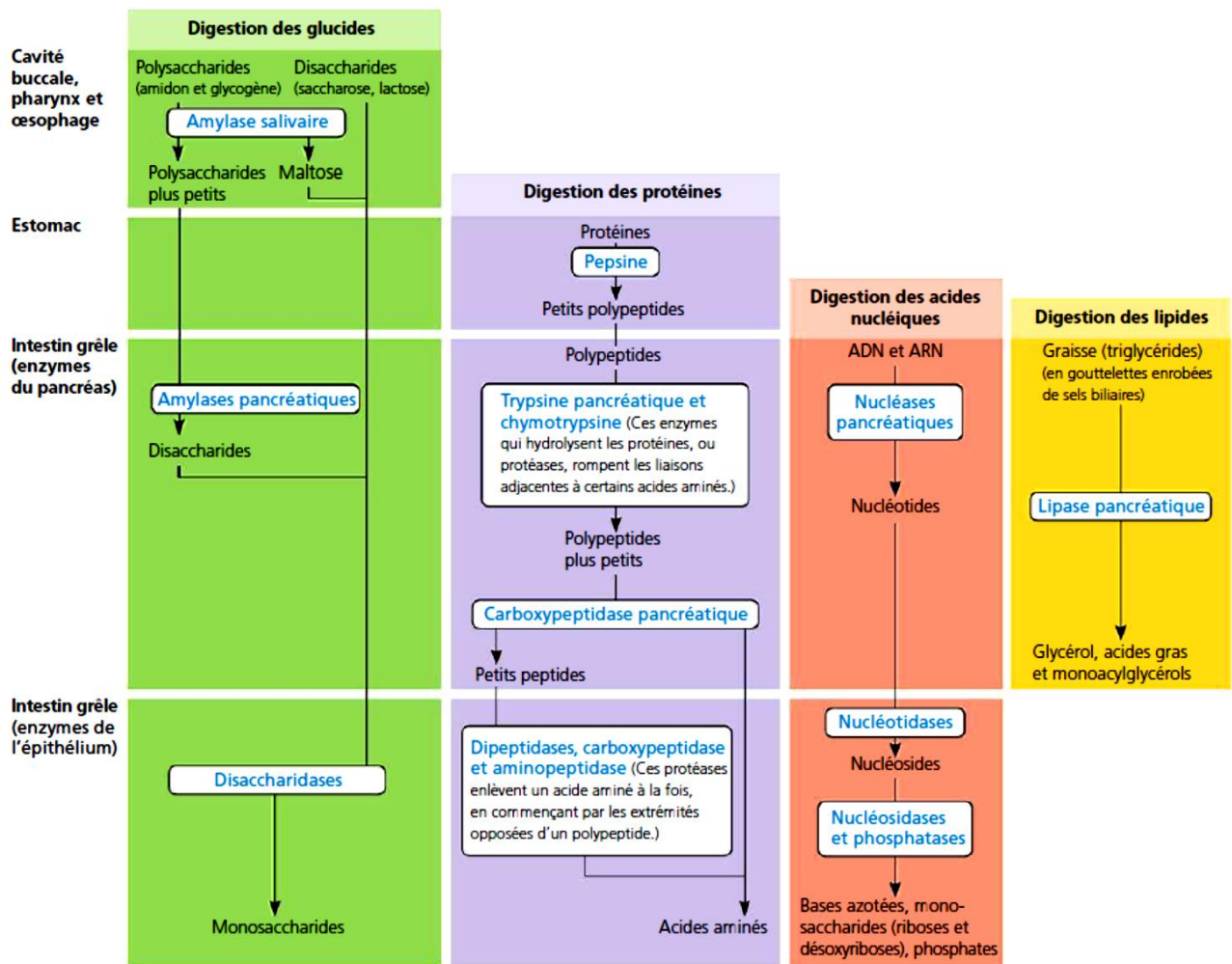


Figure 5 : Représentation schématique de la digestion enzymatique dans le système digestif humain

La régulation de la digestion s'effectue par les voies nerveuse et hormonale (fig. 6). Le système nerveux contrôle le péristaltisme et les sécrétions de l'estomac, du foie, des glandes salivaires et du pancréas. L'hormone gastrine stimule la motilité gastrique et la sécrétion des sucs gastriques. Une catégorie d'hormones duodénales, les entérogastrones, régule les activités du pancréas, de l'estomac, du foie et de la vésicule biliaire. L'absorption d'eau et d'électrolytes constitue une des fonctions essentielles du gros intestin. Le gros intestin (principalement le côlon) aide l'intestin grêle à réabsorber de l'eau et des électrolytes. Il abrite des bactéries dont certaines synthétisent des vitamines (biotine, acide folique, vit. K et plusieurs vitamines du complexe B).

Les matières fécales traversent le rectum et sont éliminées par l'anus.

Les adaptations du système digestif des vertébrés au cours de l'évolution

Les adaptations structurales du système digestif sont souvent associées au régime. Les Mammifères ont une dentition qui correspond généralement à leur régime alimentaire. Les herbivores ont habituellement un tube digestif plus long que les autres Mammifères, car il faut plus de temps pour digérer les matières végétales que les matières animales. Des microorganismes symbiotiques contribuent à la nutrition de nombreux Vertébrés. Beaucoup d'herbivores possèdent des chambres de fermentation spéciales, dans lesquelles des microorganismes mutualistes digèrent la cellulose.

2- Circulation et échanges gazeux

2.1- La circulation chez les animaux

Comme les unicellulaires, les organismes pluricellulaires simples (diploblastiques) ou constitués d'un faible nombre de cellules peuvent effectuer leurs transports de matière par simple diffusion entre le milieu extérieur et les cellules.

À l'opposé, chez les animaux de grande taille, le phénomène de diffusion ne suffit plus aux échanges avec l'extérieur. Chez ces animaux, le milieu extracellulaire est compartimenté dans un système circulatoire plus ou moins brassé.

2.1.1-Mise en mouvement du milieu intérieur

a) Par simple brassage

Dans les cas les plus simples (Triploblastiques acéломates), ce sont les mouvements de l'animal qui réalisent un brassage et assurent une circulation limitée des liquides interstitiels (fig. 1 A). L'apparition d'un système circulatoire permet de ne mettre en mouvement qu'une partie des liquides internes.

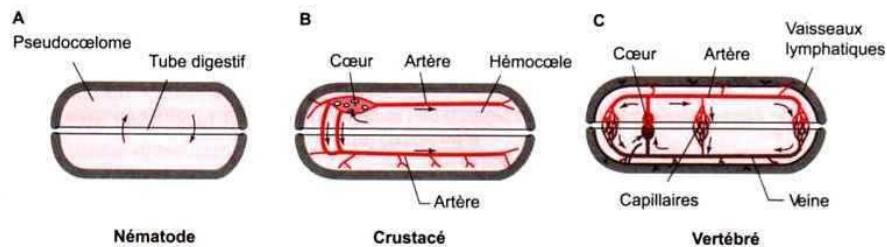


Figure 1 : Organisation schématique des systèmes de circulation des liquides internes.
A : un brassage simple chez les Nématodes, B : un système circulatoire ouvert chez les Crustacés,
C : un système circulatoire clos chez les Vertébrés.

b) Système circulatoire ouvert

La plupart des Arthropodes et des Mollusques présentent un système circulatoire dans lequel le sang circule dans des vaisseaux qui s'ouvrent sur le cœlome et les espaces interstitiels (fig. 1 B). Le retour vers le cœur se fait via des sinus de l'espace interstitiel. Les systèmes circulatoires ouverts sont peu efficaces lorsqu'ils sont dépourvus d'organe de propulsion. La présence d'un cœur permet un gain d'efficacité, mais l'ouverture du système limite à la fois la pression d'irrigation et la vitesse de circulation, donc l'apport de nutriments.

c) Système circulatoire clos

Dans un système circulatoire clos, le sang est mis en mouvement par un ou plusieurs cœurs. Il circule sous pression dans un système de vaisseaux et retourne au cœur par d'autres vaisseaux en continuité avec les premiers. Les échanges sont réalisés au niveau de vaisseaux à paroi peu épaisse, les capillaires.

L'endiguement complet du liquide circulant est déjà présent chez des phylums relativement primitifs comme les Annélides ou les Mollusques Céphalopodes, mais se développe essentiellement chez les Vertébrés (fig. 1 C).

Ce système permet, d'une part une circulation rapide et une pression sanguine élevée et, d'autre part, la possibilité d'ajuster finement et rapidement les flux sanguins locaux par variation du diamètre vasculaire.

2.1.2- Les cœurs : organes de brassage

La mise en mouvement du liquide endigué est due, soit aux mouvements du corps (Annélides), soit à la contraction de certains segments vasculaires (Insectes), soit encore aux mouvements rythmiques d'un cœur (Vertébrés). Ce dernier type de pompe présente de nombreuses variations mais l'évolution la plus importante est constituée par l'apparition d'un cloisonnement. Le degré de cloisonnement est à mettre en relation avec l'évolution du système respiratoire et le développement de poumons.

a) Les cœurs non cloisonnés

Les cœurs non cloisonnés possèdent un nombre variable de chambres (d'une à quatre) placées en série. Chez les Téléostéens, par exemple, il existe un sinus veineux non contractile en amont de l'atrium et un bulbe artériel (Téléostéens) ou cône artériel (Élasmobranches) en aval du ventricule (fig. 2 B). La circulation du sang est le fait des contractions successives de l'atrium, du ventricule puis du bulbe artériel.

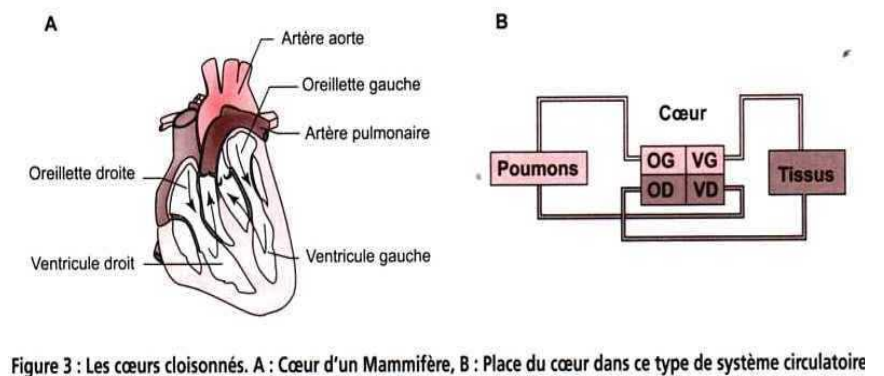
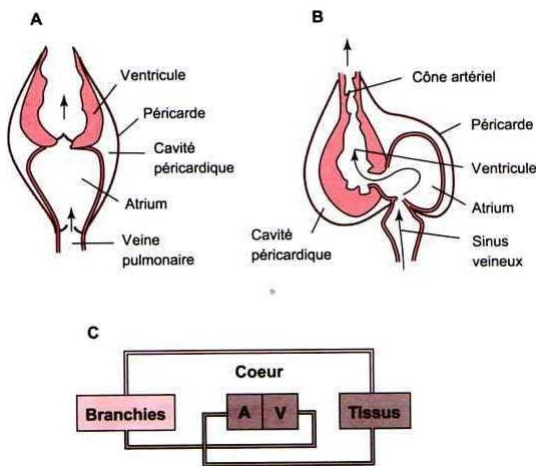


Figure 3 : Les cœurs cloisonnés. A : Cœur d'un Mammifère, B : Place du cœur dans ce type de système circulatoire

Figure 2 : Les cœurs sans cloison (A à deux chambres : mollusques ; B à quatre chambres : Téléostéen ; C place du cœur dans ce type de système circulatoire)

b) Les cœurs cloisonnés

Chez les Reptiles Crocodyliens, les Oiseaux et les Mammifères, le cloisonnement est total, il y a deux atriums et deux ventricules (fig. 3 A).

2.1.3- Le système circulatoire humain

Dans le système circulatoire clos, l'appareil cardiovasculaire humain assure la liaison entre les différents organes. Le sang, phase circulante du milieu intérieur, est propulsé dans le système par le biais d'une pompe, le cœur, muscle creux à l'origine des mouvements du sang dans le circuit vasculaire. La distribution du sang dans l'ensemble de l'organisme est assurée par un réseau dense de vaisseaux. Les artères, par lesquelles le sang quitte le cœur, les veines qui ramènent le sang vers le cœur et les capillaires qui relient artères et veines et permettent les échanges avec les liquides interstitiels (fig. 4). Chez les Mammifères, et chez l'Homme, le cœur est cloisonné, ce qui détermine deux cœurs fonctionnels, le cœur gauche et le cœur droit formés chacun de deux cavités, une oreillette (atrium) et un ventricule, communiquant entre elles *via* une valve auriculo-ventriculaire. Ce cloisonnement impose un trajet sanguin selon deux circuits placés en série : la circulation systémique, qui part du cœur gauche, et la circulation pulmonaire, qui part du cœur droit. La totalité du sang passe donc successivement dans les deux cœurs en respectant à chaque fois un trajet atrium-ventricule.

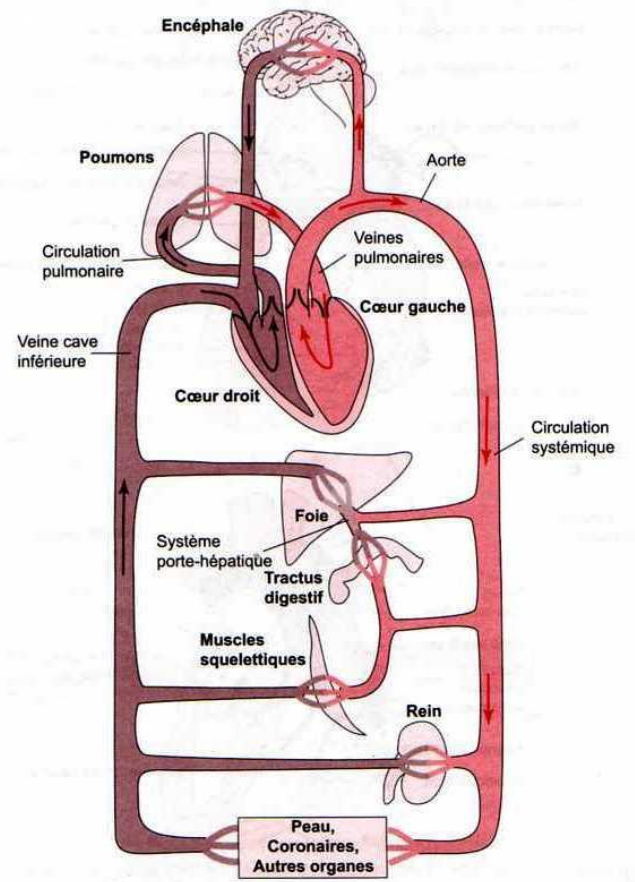


Figure 4 : Schéma de l'appareil cardiovasculaire

Les valves cardiaques orientent le sang de manière unidirectionnelle. La fréquence cardiaque (le pouls) correspond au nombre de battements du cœur par minute. La révolution cardiaque est un cycle qui comporte une phase d'éjection du sang, pendant une contraction appelée *systole*, et une phase de remplissage du cœur, pendant une relaxation appelée *diastole*. Le débit cardiaque correspond au volume de sang éjecté dans la circulation systémique par minute. La fréquence des contractions du muscle cardiaque est coordonnée par un réseau de conduction électrique, qui trouve son origine dans le nœud sinusal (ou centre rythmogène) de l'oreillette droite. Ce nœud réagit en fonction de la stimulation produite par des nerfs ou des hormones, de la température corporelle et de l'exercice physique.

Les différences structurales entre les artères, les veines et les capillaires sont en corrélation avec les fonctions de ces vaisseaux. Un endothélium constitue la tunique interne de tous les vaisseaux sanguins, et la seule couche de tissu des capillaires. Les artères et les veines ont deux autres tuniques: la tunique externe et la tunique moyenne. La première est faite de tissu conjonctif contenant des fibres collagènes; la deuxième se compose de tissu musculaire lisse, de fibres élastiques et de fibres collagènes. Les artères possèdent la paroi la plus épaisse, la plus résistante et la plus élastique (fig. 5). Il s'agit d'une adaptation à l'augmentation de la pression sanguine et au mouvement rapide du sang. Les mouvements corporels contribuent à ramener le sang vers le cœur par les veines; les grandes veines sont munies de valves unidirectionnelles.

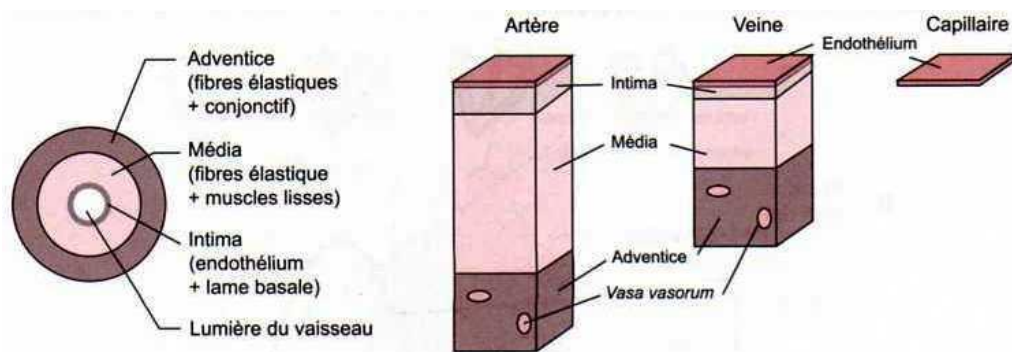


Figure 5: Structure générale d'un vaisseau et particularités des artères, veines et capillaires

L'approvisionnement en sang des différents organes est déterminé par la constriction variable des artérioles et des sphincters précapillaires. Les substances traversent l'endothélium des capillaires de diverses manières : par endocytose et par exocytose, par diffusion, ou encore par dissolution dans des liquides expulsés par des fentes intercellulaires sous l'effet de la pression sanguine à l'extrémité artérielle du capillaire.

Les liquides réintègrent la circulation par voie directe, à l'extrémité veineuse du capillaire, et par voie indirecte, grâce au système lymphatique.

2.2- Les échanges gazeux chez les animaux

La plupart des cellules de l'organisme tirent leur énergie de l'oxydation des substrats organiques. Cette oxydation correspond à la respiration cellulaire, laquelle se traduit par une consommation de dioxygène et un rejet de dioxyde de carbone. Ces composés minéraux sont, en ce cas, qualifiés de gaz respiratoires. À l'échelle de l'organisme, la respiration implique des échanges de ces deux gaz entre milieu intérieur et milieu extérieur. Chez les animaux de très petite taille ou chez ceux qui ont un plan d'organisation simple (unicellulaires et Diploblastiques), les échanges se font au niveau de la surface corporelle. Chez les animaux plus complexes, Métazoaires triploblastiques coelomates en particulier, ces échanges se réalisent au travers de surfaces localisées précisément et le plus souvent spécialisées. A l'intérieur de l'organisme, les gaz sont en général véhiculés, entre tissus et échangeur respiratoire, via la circulation et le milieu intérieur.

2.2.1- Les surfaces d'échange respiratoires

Quel que soit le milieu, les échanges gazeux entre un organisme et l'extérieur se font par un mécanisme de diffusion simple. La diffusion est proportionnelle au gradient de pression partielle des gaz et à la surface de l'échangeur, et inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'épithélium respiratoire (loi de Fick).

Les milieux aériens et aquatiques apportent certaines contraintes auxquelles les échangeurs respiratoires doivent également répondre.

- L'oxygène de l'environnement est disponible sous différents états selon le type de milieu. En milieu aérien, l'oxygène, qui se présente sous forme gazeuse, est aisément disponible pour les organismes. En milieu aquatique, les gaz sont dissous et selon leur solubilité, ils sont en quantité variable : l'eau contient beaucoup moins de dioxygène que l'air, alors qu'elle contient la même quantité de CO₂.
- Le milieu aquatique est un milieu de forte densité et de forte viscosité par rapport au milieu aérien, c'est donc un milieu qui est énergétiquement coûteux à mettre en mouvement.
- **Le milieu aérien** est pauvre en eau, c'est un milieu desséchant qui oblige à une internalisation des échangeurs respiratoires.

L'ensemble de ces contraintes conduit à l'existence de plusieurs types d'arrangement des surfaces respiratoires en fonction des milieux de vie et du plan d'organisation des organismes (fig. 6).

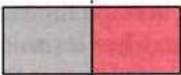
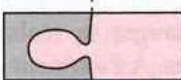
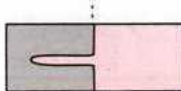
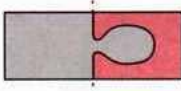
| Type d'échangeur | Corps de l'animal | Milieu extérieur | Exemples | Particularités de la structure |
|------------------|---|------------------|--|--|
| Tégument |  | air eau | Annélides oligochètes Insectes collemboles | Structure peu spécialisée, compatible avec la respiration en milieu aquatique ou aérien humide |
| Poumon aérien |  | air | Gastéropodes pulmonés Vertébrés tétrapodes | Structure invaginée limitant la deshydratation, adaptée au milieu aérien |
| Système trachéen |  | air | Arachnides Insectes | Structure particulière, invaginée, peu deshydratante, et apportant les gaz respiratoires directement au contact des cellules |
| Branchie |  | eau | Annélides polychètes Mollusques, Poissons, têtards d'Amphibiens | Structure évaginée (expansion) évitant une convection externe coûteuse et adaptée à la portance du milieu aquatique |

Figure 6 Principales surfaces d'échanges de gaz respiratoires entre l'animal et son milieu de vie

2.2.2- Les principaux types d'appareils respiratoires et leur fonctionnement

Chez les animaux de très petite taille ou chez ceux qui ont un plan d'organisation simple (unicellulaires et Diploblastiques), les échanges se font au niveau de la surface corporelle. Chez les animaux plus complexes, Métazoaires triploblastiques coelomates en particulier, ces échanges se réalisent au travers de surfaces localisées précisément et le plus souvent spécialisées, **branchies**, **poumons** ou **trachées**.

a) Le système branchial

Les branchies sont des évaginations localisées de la surface du corps, spécialisées dans les échanges respiratoires. Ces organes se rencontrent chez un grand nombre d'invertébrés (Annélides, Mollusques, Crustacés, etc.) et de Vertébrés aquatiques (Poissons et larves d'Amphibiens). Ils permettent de répondre aux besoins en dioxygène d'organismes de grande taille et ayant une activité importante.

Chez les Téléostéens, les branchies, localisées au niveau de fentes de la paroi pharyngienne, mettent en relation la cavité bucco-pharyngée et deux cavités, ou chambres, branchiales. Celles-ci communiquent avec le milieu extérieur par une fente, l'ouïe (fig. 7 A). Des mouvements buccaux et operculaires, commandés par une musculature propre, facilitent chez ces Poissons l'écoulement de l'eau qui baigne les branchies.

Chaque branchie se développe au niveau d'un arc squelettique, l'arc branchial. Elle est constituée par une succession de feuillets ou lames branchiales, disposées perpendiculairement à l'arc branchial (fig. 7 B).

L'oxygénation du sang, ou hématoxe, se réalise au niveau des replis secondaires des lames branchiales, et disposés perpendiculairement à celles-ci. Ces dernières sont parcourues par un réseau de capillaires, souvent sans endothélium propre (lacunes sanguines). L'épithélium des lamelles forme, autour de ces capillaires ou lacunes, deux feuillets très minces, maintenus écartés par des cellules en « pilier ». Ainsi, le sang qui circule entre les piliers n'est séparé du milieu extérieur que de quelques micromètres (fig. 8).

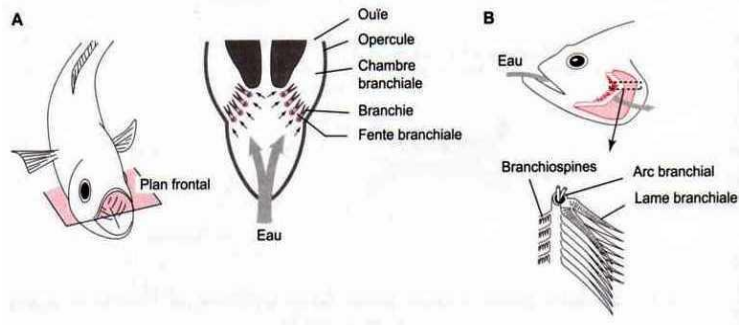


Figure 7 : Organisation fonctionnelle de l'appareil branchial des Téléostéens

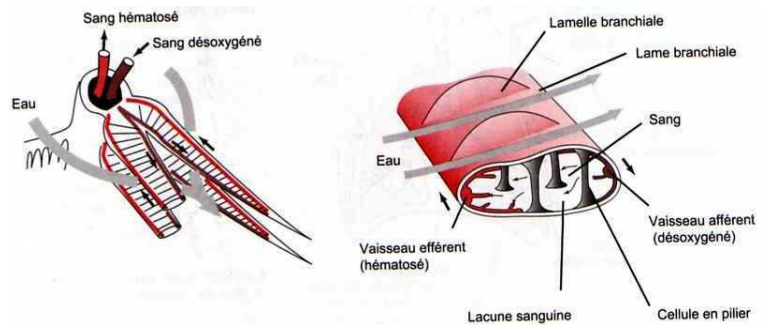


Figure 8 : Zone d'hématoxe et convection des flux d'eau et de sang

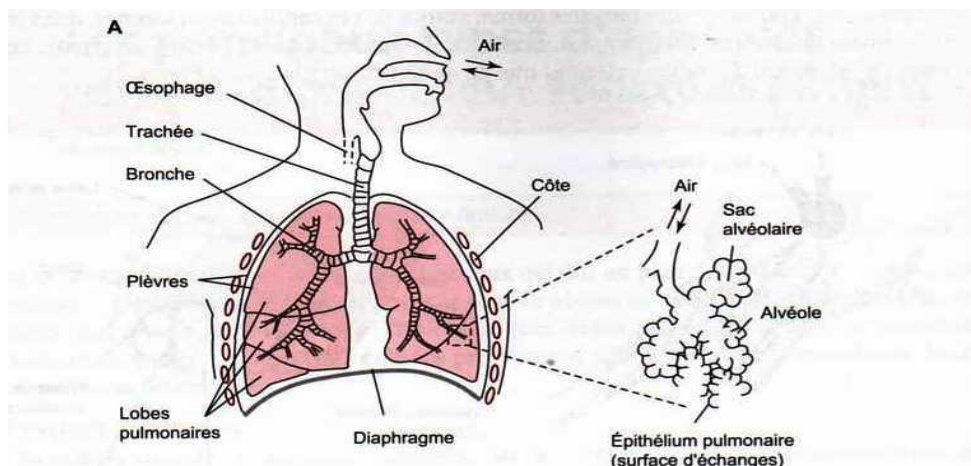
b) Le système pulmonaire

Les poumons ont en commun d'être des cavités généralement fortement vascularisées. Des poumons primitifs, sans réel support ventilatoire, existent chez quelques groupes d'invertébrés (Gastéropodes Pulmonés, Isopodes terrestres, Arachnides). Les poumons à ventilation active existent chez les Vertébrés aériens. Chez les Mammifères, les poumons, localisés dans la cage thoracique, sont constitués d'un parenchyme lâche, parcouru par des conduits aériens et par des vaisseaux sanguins.

Dans les poumons, le contact air-sang se fait au niveau des alvéoles, petits sacs dont la paroi très fine est accolée à des capillaires sanguins et dont l'apport en air se fait par des conduits aériens, les bronches et les bronchioles (fig. 9 A).

La surface alvéolaire importante (80 m² par poumon chez l'Homme) et la minceur de l'échangeur (0.2 à 0.4 μm) permettent une diffusion rapide et efficace des gaz respiratoires (fig. 9 B et C).

Le renouvellement de l'air dans les poumons se fait par aspiration puis refoulement vers l'extérieur sous l'effet des variations de pression créées par les muscles de la cage thoracique.



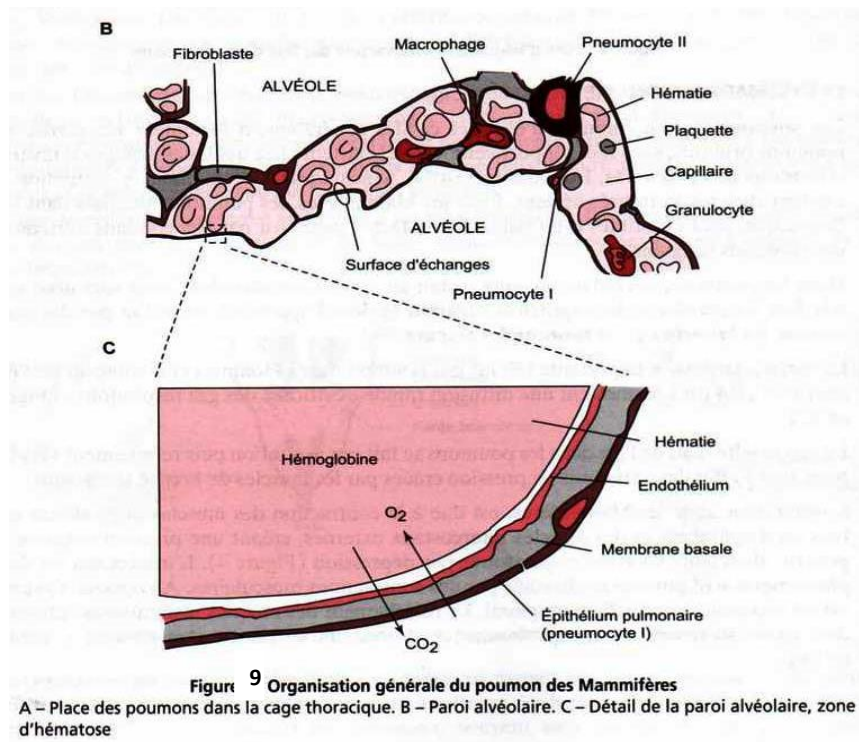


Figure 9 Organisation générale du poumon des Mammifères
A - Place des poumons dans la cage thoracique. B - Pari alvéolaire. C - Détail de la paroi alvéolaire, zone d'hématose

c) Le système trachéen

Chez la plupart des Arthropodes terrestres, l'air est conduit directement aux tissus par un ensemble de tubes fortement ramifiés, les trachées (fig. 10 A). Ces trachées sont des invaginations tégumentaires qui communiquent avec l'extérieur par de petits orifices, les stigmates.

Dans les systèmes trachéens (fig. 10), le dioxygène est amené à proximité immédiate des cellules sous forme gazeuse : ce système ne nécessite ni surface d'échanges spécialisée, ni milieu intérieur pour distribuer les gaz respiratoires vers les tissus (O₂) ou assurer leur retour vers l'extérieur (CO₂). L'air diffuse dans les trachées jusqu'aux cellules trachéolaires, c'est au niveau des extrémités des trachéoles que se font les échanges avec les cellules environnantes (fig. 10 D).

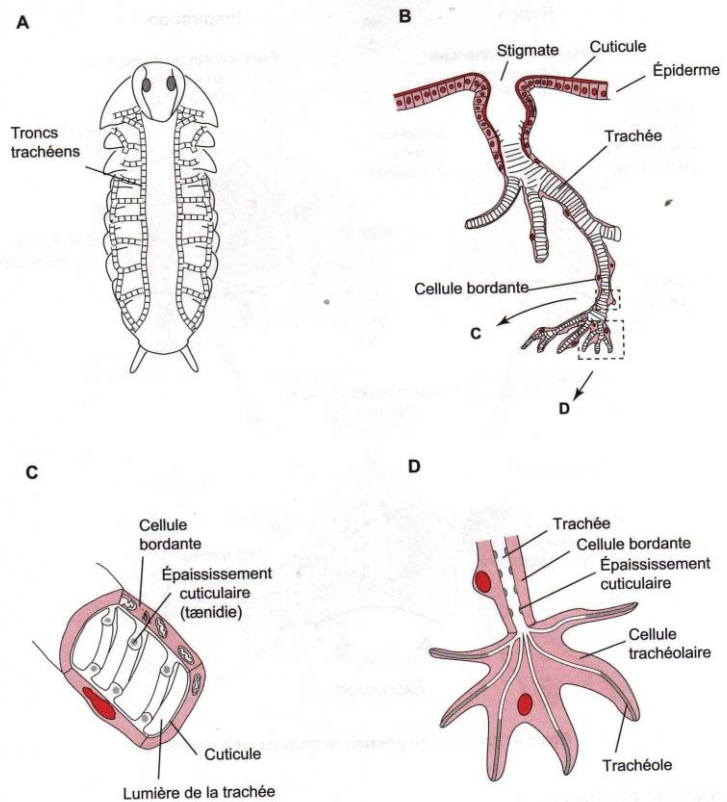


Figure 10 Structure d'une trachée d'Insecte
A - Principaux troncs trachéens de la Blatte, B - Organisation générale d'une trachée, C - Détail de la paroi trachéenne, D - Extrémité de la trachée et cellule trachéolaire.

2.2.3- Le transport des gaz respiratoires par le sang

a) Les formes de transport des gaz respiratoires

Le CO₂ est très soluble dans le sang, son transport peut ainsi se faire sous une forme dissoute. En milieu aqueux le CO₂ se combine à l'eau pour fournir des ions hydrogénocarbonates HCO₃⁻. Le CO₂ peut également se combiner à des protéines plasmatiques ou à un transporteur érythrocytaire protéique tel que l'hémoglobine.

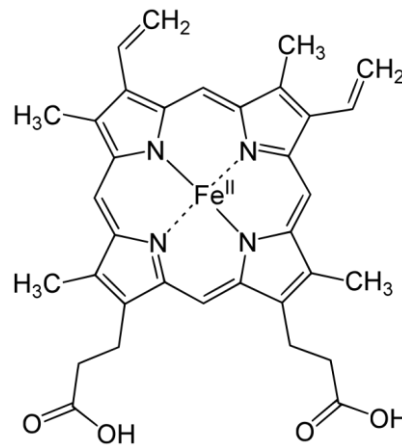
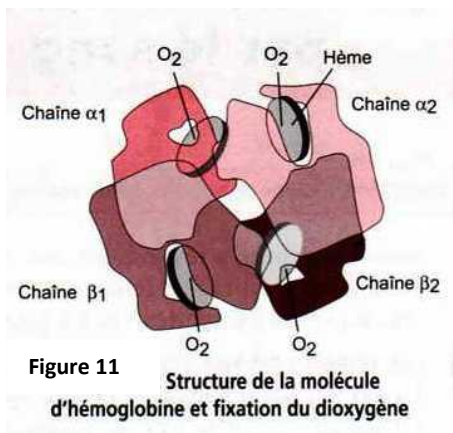
À l'opposé, la faible solubilité du dioxygène nécessite la présence de transporteurs spécifiques capables de fixer le dioxygène au niveau de l'appareil respiratoire, et de le relarguer au niveau tissulaire. Il existe plusieurs types de transporteurs de gaz respiratoires dans le règne animal, tous sont des metalloprotéines qualifiées de

pigments respiratoires: hémoglobines, chlorocruorines, hémérythrine et hémocyanines. Ces pigments sont plasmatiques ou érythrocytaires. Chez les Vertébrés, l'hémoglobine est contenue dans les érythrocytes.

b) L'hémoglobine : transporteur de gaz

Les hémoglobines sont des molécules tétramériques constituées de 4 chaînes polypeptidiques (globines) semblables deux à deux. Chacune de ces chaînes possède un hème lui-même constitué de 4 noyaux pyrrole liés les uns aux autres et centré sur un ion ferreux unique (Fe^{2+}). Cet atome de fer permet la fixation d'un dioxygène, une hémoglobine peut ainsi fixer 4 molécules de dioxygène (fig. 11).

La molécule d'hémoglobine peut également fixer un CO_2 mais sur un site de la molécule de globine et non sur l'hème.



c) La prise en charge et le relargage des gaz

Les échanges gazeux se font par diffusion selon les gradients de pression partielle tant au niveau alvéolaire que tissulaire

- **au niveau pulmonaire**, le gradient induit un passage du dioxygène vers le sang. Le dioxygène solubilisé se fixe sur l'hémoglobine et induit une série de réactions qui conduisent à une augmentation locale du taux de CO_2 dissous (par relargage du CO_2 de l'hémoglobine et par reformation de CO_2 à partir du HCO_3^-). Le gradient de CO_2 est alors favorable à une diffusion vers l'air alvéolaire.

- **au niveau des tissus**, le phénomène est inverse. La production locale de CO_2 est importante. il y a donc diffusion du CO_2 vers le sang et augmentation des taux de CO_2 et de HCO_3^- . Cela induit également une diminution du pH sanguin local qui modifie les propriétés de l'hémoglobine et provoque un relargage du dioxygène fixé à l'hémoglobine. Le dioxygène ainsi relargué passe sous forme dissoute puis diffuse vers les tissus (fig. 12).

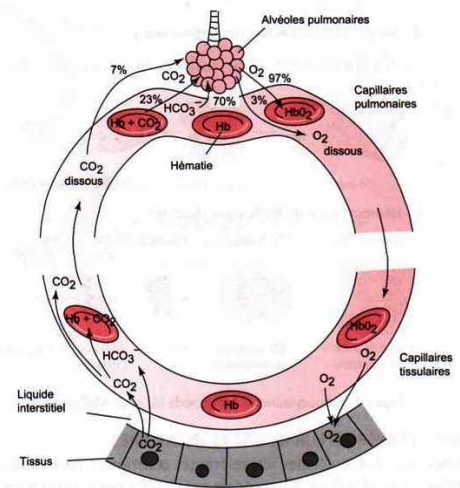


Figure 12 : Couplage des échanges de CO_2 et d' O_2 au niveau des poumons et des tissus de l'homme

Des centres de régulation situés dans le pont et le bulbe rachidien établissent la fréquence respiratoire de base. Des chimiorécepteurs détectent les variations du pH sanguin (qui est en lien avec la concentration en CO_2), ainsi que celles du dioxygène dans le sang. Le bulbe rachidien modifie la fréquence et l'amplitude de la respiration en fonction des besoins métaboliques du corps.

3- La régulation du milieu interne

3.1- Vue d'ensemble de l'homéostasie

Le terme "homeostasie" a été proposé par Walter Bradford Cannon, physiologiste américain au cours des années 1920, du grec « *homoios* » (égal, semblable à), et « *stasis* » (état, position) : « Les processus physiologiques coordonnés qui maintiennent l'équilibre dans l'organisme sont si complexes et si particuliers aux créatures qu'ils vont impliquer le cerveau, le cœur, les poumons, les reins et la rate, tous travaillant coopérativement que j'ai suggéré une définition pour ces états, c'est l'homéostasie ».

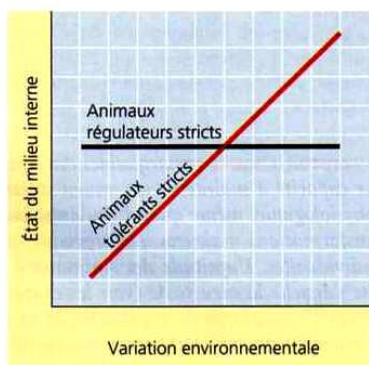
Le mot n'implique pas que quelque chose est au repos ou immobile. Homéostasie : état constant ! Cela signifie une condition - une condition qui peut varier, mais qui est relativement constante » \Rightarrow « Régulation des constantes physiologiques du milieu intérieur »

3.1.1- La régulation et la tolérance

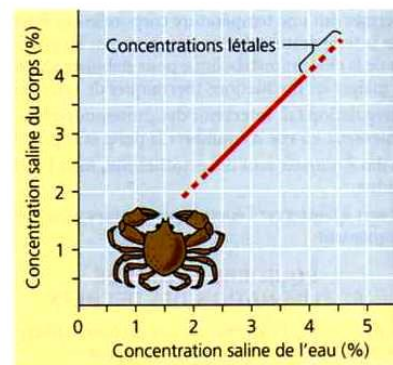
La régulation et la tolérance sont les deux réactions opposées des animaux face aux fluctuations du milieu.

On qualifie un animal de **régulateur** en ce qui a trait à une variable environnementale particulière s'il utilise des mécanismes homéostatiques pour atténuer le changement de son milieu interne lorsque son environnement externe fluctue. Par exemple, les endothermes comme les Mammifères et les Oiseaux sont des *thermorégulateurs* : ils maintiennent leur température corporelle autour d'une valeur de référence, indépendamment des changements de la température du milieu environnant. Un autre exemple, les Saumons passent une partie de leur vie dans l'eau salée, et l'autre partie, dans l'eau douce. Ce changement de leur « environnement osmotique » les amène à utiliser des mécanismes d'osmorégulation pour maintenir des concentrations normales de solutés dans leur sang et dans leur liquide interstitiel.

Comparativement à ces régulateurs, de nombreux autres animaux, particulièrement ceux qui vivent dans des environnements relativement stables, sont qualifiés de **tolérants**, parce qu'ils supportent des variations de leur milieu interne liées à certains changements de l'environnement externe (fig. 1a). De nombreux invertébrés marins, comme les Araignées de du genre *Libinia*, vivent dans des milieux où la salinité est relativement stable et ils ne possèdent pas de structures capables d'osmorégulation. Si on les place dans une eau dont la salinité est variable, leurs seules réactions possibles consistent à absorber ou à rejeter de l'eau pour s'adapter à l'environnement externe, même si cette réponse interne peut causer leur mort dans des situations extrêmes (fig. 1b).



(a) En ce qui a trait à une variable environnementale donnée, certains animaux sont capables de régulation (leur milieu interne reste presque toujours constant, indépendamment des variations possibles de leur environnement), alors que d'autres sont capables de tolérance (leur milieu interne varie suivant les fluctuations de leur environnement). Les deux stratégies sont illustrées sous une forme idéalisée, la plupart des Animaux n'étant ni totalement tolérants ni complètement régulateurs.



(b) Les Araignées de mer (*Libinia sp.*) sont des animaux osmotolérants : ils sont incapables ou presque de réguler leur concentration interne de sels, qui suit les variations limitées de la salinité de l'environnement dans lequel ils vivent habituellement. Si les Araignées de mer sont exposées dans un laboratoire à une salinité légèrement supérieure à 4 % ou inférieure à 2,3 %, elles absorbent et rejettent de l'eau jusqu'à ce que mort s'ensuive. Ces animaux tolérants ne possèdent pas les structures capables de rejeter ou d'absorber un excès de sel.

FIGURE 1.1 Comparaison de l'état du milieu interne des animaux régulateurs et des animaux tolérants.

Les animaux tolérants stricts ou régulateurs stricts représentent deux catégories limites d'un continuum. La plupart des animaux se situent entre ces deux extrêmes. Par exemple, les Saumons effectuent l'osmorégulation tout en étant tolérants face fluctuations de la température externe.

« Selon la situation, la plupart des Animaux utilisent une forme combinée de ces deux stratégies ».

3.1.2- L'homéostasie équilibre les gains ainsi que les pertes d'énergie et de matière chez les Animaux

Comme tous les organismes, les animaux sont des systèmes ouverts qui échangent de l'énergie et de la matière avec l'environnement: des aliments doivent leur fournir les éléments nutritifs essentiels et de l'énergie chimique; le dioxygène est essentiel à la respiration cellulaire; le CO₂ et les autres déchets métaboliques doivent être éliminés; la chaleur et l'eau doivent être échangées; et ainsi de suite. Ces flux entrants et sortants d'énergie et de substances sont souvent rapides et variables, mais il faut que les animaux maintiennent des conditions internes relativement constantes. C'est ainsi que les pertes et les gains doivent s'équilibrer, sinon des déséquilibres éventuellement mortels risquent de survenir. En temps normal, la quantité d'énergie et de matière qui entre dans un animal ne dépasse pas celle qui sort, sauf si l'animal est en période de croissance ou de reproduction.

Comme l'homéostasie exige un équilibre précis de la matière et de l'énergie, on peut la considérer comme un ensemble d'**allocations** comportant des gains et des pertes (allocations thermique, énergétique, hydrique, etc.). La plupart des allocations d'énergie et de matière sont interreliées : les changements dans le flux d'un élément se répercutent sur les échanges d'autres éléments. Par exemple, quand les animaux terrestres échangent des gaz avec l'environnement en respirant, ils perdent aussi de l'eau par une vaporisation qui a lieu à la surface humidifiée de leurs poumons. Ces pertes doivent être compensées par l'absorption d'une quantité équivalente d'eau (dans les aliments ou les liquides). En outre, la vaporisation fait perdre au corps de la chaleur, et cette perte doit être compensée par la production d'une quantité équivalente de chaleur issue d'une autre source.

3.2- La régulation de la température corporelle

La **thermorégulation** est le mécanisme par lequel les animaux maintiennent leur température interne dans un intervalle compatible avec la vie. Cette capacité est essentielle à la survie parce que la plupart des processus biochimiques et physiologiques sont extrêmement sensibles aux variations de la température corporelle. La vitesse de la plupart des réactions enzymatiques diminue d'un facteur de deux ou trois pour chaque diminution de température de 10 °C. L'élévation de la température engendre une légère accélération de la vitesse des réactions enzymatiques jusqu'à ce qu'elle devienne critique et que les protéines commencent à se dénaturer. Par exemple, à mesure que la température s'élève, l'hémoglobine se lie moins efficacement à l'oxygène. La température influe également sur les propriétés des membranes.

Chaque espèce animale a son propre intervalle optimal de température. La thermorégulation permet de maintenir la température corporelle dans cet intervalle, ce qui permet à ses cellules de fonctionner efficacement même si la température externe fluctue.

3.2.1- L'endothermie et l'ectothermie

Le métabolisme interne et l'environnement externe sont les sources de chaleur de la thermorégulation. Les Oiseaux et les Mammifères sont principalement des **endothermes**, ce qui signifie que les activités métaboliques constituent leur principale source de chaleur. Quelques Reptiles, certains Poissons et de nombreuses espèces d'Insectes sont également des endothermes. La plupart des Invertébrés, des Poissons, des Amphibiens, des lézards, des serpents et des tortues sont, eux, des **ectothermes**. Ils tirent presque toute leur chaleur de leur environnement.

Lorsqu'on dit d'un animal qu'il est endotherme ou ectotherme, on veut dire qu'il est *principalement* l'un ou l'autre. Il faut garder à l'esprit que l'endothermie et l'ectothermie ne sont pas des modes de thermorégulation mutuellement exclusifs. Par exemple, un oiseau est d'abord un endotherme, mais il peut se réchauffer au soleil par temps froid, à l'instar d'un lézard, qui est un ectotherme.

Les endothermes arrivent à maintenir une température interne très stable même quand la température de l'environnement fluctue. C'est pourquoi peu d'ectothermes sont actifs durant les quelques mois où règne un froid glacial sur une grande partie de la surface de la Terre.

3.2.2- Les variations de la température corporelle

La température corporelle des animaux peut varier ou être constante. Un animal dont la température corporelle varie en fonction de celle de l'environnement est un **poïkilotherme** (du grec *poikilos*, qui signifie «variable»). À l'inverse, un **homéotherme** est un animal qui maintient une température interne relativement stable. Par exemple, l'achigan à grande bouche est un poïkilotherme, tandis que la loutre de rivière est un homéotherme.

La description des ectothermes et des endothermes peut donner à penser que tous les ectothermes sont poïkilothermes et que tous les endothermes sont homéothermes. En fait, il n'existe pas de lien direct entre la source de chaleur et la stabilité de la température corporelle. Par exemple, de nombreux poissons marins et des Invertébrés habitent des eaux dont les températures sont si stables que leur température corporelle varie encore moins que celle des humains et d'autres Mammifères.

À l'inverse, certains endothermes connaissent de grandes variations de leur température interne. Par exemple, les chauves-souris et les colibris peuvent entrer périodiquement dans un état léthargique marqué par une diminution de leur température corporelle.

L'idée que les ectothermes sont des animaux à « sang froid » et que les endothermes sont des animaux à « sang chaud » constitue une autre idée fausse courante. La température corporelle des ectothermes n'est pas nécessairement basse. En fait, quand ils se chauffent au soleil, la température interne de beaucoup de lézards ectothermes est supérieure à celle des Mammifères. Par conséquent, la plupart des scientifiques préfèrent ne pas employer les termes à *sang froid* et à *sang chaud*, qui peuvent induire en erreur.

3.2.3- L'équilibre entre la perte et le gain de chaleur

La thermorégulation relève de la capacité d'un animal à moduler l'échange de chaleur avec son environnement. Comme tous les objets, les organismes ectothermes et endothermes échangent de la chaleur par quatre processus physiques : la conduction, la convection, le rayonnement et la vaporisation. La figure 2 caractérise chacun de ces mécanismes par lesquels la chaleur circule dans l'organisme et se diffuse dans l'environnement. Il faut bien noter que la chaleur se propage toujours d'un objet où la température est élevée vers un objet où elle est plus basse.

La thermorégulation consiste à maintenir une quantité de chaleur équivalente à la quantité de chaleur perdue. Les animaux y parviennent par des mécanismes qui réduisent l'échange de chaleur dans son ensemble ou qui favorisent le passage de la chaleur dans une direction particulière. Chez les Mammifères, plusieurs mécanismes de thermorégulation sont associés au **système tégumentaire**, c'est-à-dire à la couche externe de l'organisme, constituée de la peau, des poils et des ongles (les griffes ou les sabots chez certaines espèces).

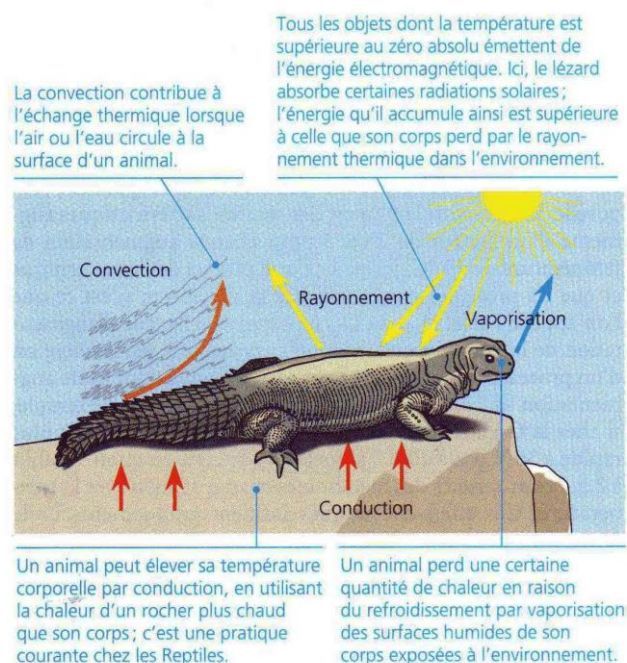


Figure 2 : Echanges thermiques entre un organisme et son environnement

L'isolation

L'isolation constitue une grande adaptation thermorégulatrice chez les Mammifères et chez les Oiseaux. Elle consiste à réduire le flux thermique entre le corps et l'environnement, et à abaisser le coût énergétique du maintien de la température. Les poils, les plumes et les couches de graisse formées par le tissu adipeux contribuent à l'isolation.

De nombreux animaux qui comptent sur l'isolation pour assurer leur thermorégulation disposent de couches isolantes dont ils peuvent tirer profit pour réduire les pertes de chaleur. La plupart des mammifères terrestres et de nombreux oiseaux réagissent au froid en gonflant leur fourrure ou leurs plumes. Ce faisant, ils emprisonnent une couche d'air plus épaisse, ce qui augmente passablement la capacité isolante du plumage ou de la fourrure. Pour repousser l'eau qui réduirait la capacité isolante de leurs plumes ou de leurs poils, certains animaux sécrètent des substances huileuses, comme celles que les oiseaux appliquent sur leurs plumes lors du lissage. L'isolation est tout particulièrement importante pour les mammifères marins tels que les baleines et les morses. Ces animaux nagent dans une eau dont la température est bien plus froide que celle de l'intérieur de leur corps. Un grand nombre de ces espèces passent au moins une partie de l'année dans des mers polaires où l'eau atteint presque le point de congélation. Leur thermorégulation est d'autant plus difficile que, dans l'eau, la perte de chaleur par conduction est de 50 à 100 fois plus rapide que dans l'air. C'est pourquoi les mammifères marins possèdent une couche très épaisse de gras isolant sous leur peau, appelée lard. Ce lard est tellement efficace qu'il maintient une température corporelle de l'ordre de 36 à 38 °C et son métabolisme est comparable à celui des mammifères terrestres.

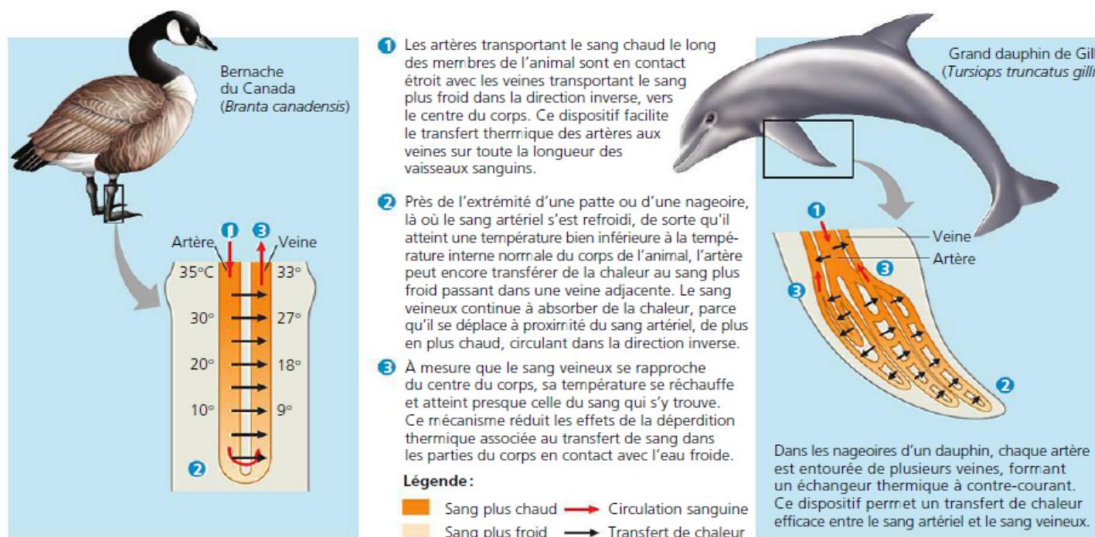
La régulation de la circulation sanguine

Les systèmes circulatoires jouent un rôle important dans l'échange de chaleur entre le milieu interne et l'environnement. Les adaptations qui régulent la circulation du sang proche de la surface du corps ou qui gardent la chaleur au centre du corps sont essentielles à la thermorégulation. En réaction aux variations de température de leur environnement, de nombreux animaux peuvent modifier la quantité de sang (et donc de chaleur) qui circule entre les parties internes de leur corps et leur peau. Un apport sanguin élevé dans la peau résulte normalement de la **vasodilatation**, soit l'augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins superficiels. La vasodilatation est déclenchée par des influx nerveux produisant un relâchement des fibres musculaires de la paroi des vaisseaux. Ceux-ci se dilatent, entraînant alors une augmentation de la circulation sanguine. Chez les endothermes, la vasodilatation réchauffe généralement la peau, ce qui accroît le transfert de la chaleur du corps à l'environnement par radiation, conduction et convection (voir la figure 2). Le processus inverse est la **vasoconstriction**, qui réduit l'apport sanguin et le transfert thermique en diminuant le diamètre des vaisseaux superficiels. C'est le mécanisme de la vasoconstriction dans les oreilles qui permet au lièvre de ne pas souffrir d'un coup de chaleur sous le soleil du désert.

Pour réduire la déperdition thermique, de nombreux Oiseaux et Mammifères doivent compter sur l'**échange thermique à contrecourant**, c'est-à-dire sur le transfert de chaleur (ou de solutés) entre des liquides qui circulent dans des directions opposées. Dans un échangeur thermique à contre-courant, les artères et les veines passent à proximité les unes des autres (fig. 3). Grâce à cet agencement des vaisseaux sanguins, le sang chaud qui arrive du centre du corps par les artères se trouve à transférer sa chaleur au sang moins chaud qui revient des extrémités par les veines. Étant donné que le sang des veines et des artères circule dans des directions opposées, le transfert de chaleur s'effectue sur toute la longueur de l'échangeur, ce qui maximise le processus d'échange.

Des requins, des poissons et des insectes utilisent également l'échangeur thermique à contre-courant. Bien que les requins et les poissons soient des animaux tolérants au regard de la chaleur, certains d'entre eux, dont le grand requin blanc, le thon rouge et l'espadon, disposent d'échangeurs thermiques à contre-courant. Cette adaptation favorise l'activité vigoureuse et soutenue de ces animaux, car elle leur permet de garder leurs principaux muscles natatoires à une température supérieure de quelques degrés à celle des tissus de la surface du corps. De même, de nombreux insectes endothermes (les bourdons, les abeilles domestiques) ont un

mécanisme d'échange thermique à contrecourant qui maintient une température élevée dans leur thorax, où leurs muscles alaires sont situés.



▲ Figure Les échangeurs thermiques à contre-courant. Ce mécanisme aide à retenir la chaleur au centre du corps, réduisant ainsi la déperdition thermique par les extrémités, surtout lorsqu'elles sont immergées dans de l'eau froide ou en contact avec de la glace ou de la neige. En fait, la chaleur du sang artériel provenant du centre du corps est transférée directement au sang veineux qui retourne vers cette partie du corps, au lieu de se dissiper dans l'environnement.

Le refroidissement par perte de chaleur du fait de la vaporisation

Beaucoup de Mammifères et d'Oiseaux habitent dans des milieux où la thermorégulation fait intervenir des mécanismes de refroidissement et de réchauffement. Si la température du milieu est supérieure à celle de son corps, l'animal acquiert de la chaleur, car l'environnement lui en transmet alors même que son métabolisme continue à en produire. Dans ce cas, l'évaporation constitue pour lui l'unique façon d'éviter que sa température corporelle augmente rapidement. Des animaux terrestres perdent de l'eau par évaporation à travers la peau et par la respiration.

Certains animaux bénéficient d'adaptations qui peuvent augmenter sensiblement cet effet de refroidissement. Le halètement joue un rôle important chez les Oiseaux et chez de nombreux Mammifères (le chien, par exemple). Certains oiseaux sont pourvus d'un sac spécialisé, très vascularisé, dans le plancher de leur cavité buccale, et dont le gonflement et le dégonflement rapide favorisent la vaporisation.

Les réactions comportementales

Les endothermes et les ectothermes modulent leur température corporelle en adaptant leurs comportements aux changements environnementaux. Beaucoup d'ectothermes maintiennent une température corporelle presque constante grâce à des comportements simples. L'hibernation ou la migration vers un climat plus propice constituent des adaptations comportementales à des conditions de température extrêmes.

La régulation de la température corporelle des ectothermes dépend principalement de leur comportement. Quand ils ont froid, ces animaux cherchent des endroits chauds ; en outre, pour augmenter leur apport thermique, ils adoptent une position qui leur permet d'exposer la plus grande partie de leur surface corporelle à la source de chaleur. Au contraire, quand ils ont chaud, ils se retirent dans des zones plus fraîches ou s'orientent différemment.

De nombreux invertébrés terrestres modifient leur température interne en faisant appel à des mécanismes comportementaux similaires à ceux des Vertébrés ectothermes. Par exemple, le criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) doit atteindre une certaine température avant de pouvoir prendre son envol; les jours froids, il se place de manière à optimiser son exposition aux rayons solaires. D'autres invertébrés terrestres adoptent certaines postures qui leur donnent la capacité d'accroître ou d'abaisser leur absorption de chaleur solaire.

Les abeilles domestiques (*Apis mellifera*) font appel à un mécanisme de thermorégulation qui dépend d'un comportement social. Quand il fait froid, elles augmentent leur production de chaleur et s'entassent les unes sur les autres pour mieux la conserver. Certaines d'entre elles se déplacent, allant de la périphérie du regroupement vers le centre, où il fait plus chaud, ce qui permet de faire circuler et de distribuer la chaleur. Même quand elles s'entassent, les abeilles doivent dépenser une énergie considérable pour maintenir une température vitale durant de longues périodes de temps froid. 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. Ainsi, une colonie d'abeilles utilise de nombreux mécanismes de thermorégulation observés chez d'autres organismes vivant en solitaires.

En dépit de leurs nombreuses adaptations homéostatiques, les animaux sont obligés occasionnellement de faire face à des situations qui les poussent aux limites de leur capacité à équilibrer leurs allocations énergétiques. Par exemple, pendant certaines saisons de l'année (ou certains moments de la journée), la température peut atteindre des valeurs très élevées ou très basses, ou encore les aliments peuvent manquer. Pour économiser l'énergie tout en évitant de se trouver dans des circonstances difficiles ou dangereuses, certains animaux entrent dans un état de **torpeur**, c'est-à-dire un état physiologique caractérisé par une activité réduite au minimum et par un ralentissement du métabolisme.

Beaucoup de petits mammifères et d'oiseaux présentent une torpeur quotidienne qui semble adaptée à leur mode d'alimentation. Ainsi, certaines chauves-souris se nourrissent la nuit et tombent dans un état de torpeur le jour, quand elles sont inactives. Les mésanges et les colibris se nourrissent le jour et entrent généralement dans un état de torpeur pendant les nuits fraîches ; la température corporelle de la mésange tombe à 10 °C, la nuit, alors que celle de certains colibris peut passer de 40 °C, le jour, à 15 °C, la nuit. Tous les endothermes qui manifestent une torpeur quotidienne sont relativement petits, les gros mammifères étant incapables d'abaisser rapidement leur température interne. Quand ils sont actifs, la vitesse de leur métabolisme est accélérée et ils consomment beaucoup d'énergie.

L'**hibernation** est un état de torpeur prolongée, qui constitue une adaptation au froid hivernal et à la pénurie d'aliments pendant cette saison. Quand un mammifère entre en hibernation, sa température corporelle diminue. La réduction de la température peut être considérable et se faire assez rapidement (en quelques heures) : certains mammifères en hibernation maintiennent une température de 1 à 2 °C ; dans au moins un cas, celui du spermophile arctique (*Spermophilus parryii*), la température corporelle peut même descendre légèrement au-dessous de 0 °C. Les animaux qui hibernent, comme les spermophiles, sont en mesure de survivre aux longs mois d'hiver en disposant de réserves limitées d'énergie, emmagasinées dans les tissus de leur corps ou entassées dans leur terrier. De la même façon, le ralentissement du métabolisme et l'inactivité qui caractérisent l'**estivation**, ou torpeur estivale, permettent à certains animaux de survivre aux longues périodes de chaleur en comptant sur des réserves limitées d'eau.

3.3- Équilibre hydrique et élimination des déchets

L'équilibre hydrique et l'élimination des déchets s'effectuent par l'intermédiaire des épithéliums de transport. Des couches de cellules spécialisées régulent le mouvement des solutés nécessaire pour éliminer des déchets et pour stabiliser la composition des liquides corporels.

Chez la plupart des Animaux, les épithéliums de transport sont disposés en des réseaux tubulaires complexes, offrant une surface d'échange étendue. Les glandes à sel des Oiseaux marins, qui passent des mois ou des années en mer et qui doivent se procurer des aliments et de l'eau à partir de l'océan, constituent l'un des meilleurs exemples de ce type de structures (fig. 4).

Les Animaux produisent des déchets azotés qui sont en corrélation avec leur phylogénèse et leur habitat (fig. 5). Le métabolisme des protéines et des acides nucléiques génère de l'ammoniac, un déchet toxique excrété sous trois formes. La plupart des animaux aquatiques excrètent l'ammoniac à travers la surface corporelle ou l'épithélium de leurs branchies jusque dans l'eau avoisinante. Le foie des Mammifères et de la plupart des

Amphibiens adultes convertit l'ammoniac en urée, une substance moins toxique. Celle-ci est transportée dans les reins, concentrée et excrétée avec une perte d'eau minimale. L'acide urique est un précipité insoluble excrété dans l'urine pâteuse des Escargots terrestres, des Insectes, des Oiseaux et de nombreux Reptiles.

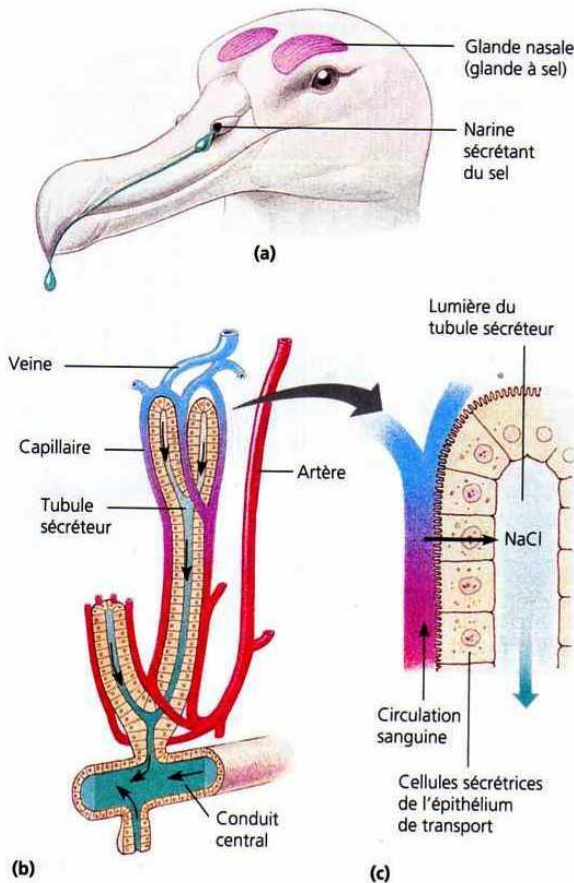


FIGURE 4 Glandes à sel de certains Oiseaux. (a) De nombreux Oiseaux marins, comme cet Albatros, peuvent vivre longtemps en pleine mer en buvant de l'eau salée, et ce, grâce à une paire de glandes nasales excréant un liquide beaucoup plus salé que l'eau de mer. Ainsi, même si la consommation d'eau de mer lui apporte beaucoup de sel, l'Albatros est en mesure d'en arriver à un gain net d'eau (en revanche, l'Humain qui boit de l'eau de mer doit utiliser plus d'eau que celle qui a été consommée pour excréter la charge saline; il ne s'hydrate donc pas). Les glandes à sel des Oiseaux marins se vident par un conduit qui mène aux narines; la solution salée dégoutte le long du bec ou est exhalée en une fine buée. (b) Ce schéma montre l'un des milliers de tubules sécréteurs présents dans une glande à sel. Chaque tubule est tapissé d'un épithélium de transport entouré de capillaires et se vide dans un conduit central. (c) Les cellules sécrétrices de l'épithélium de transport procèdent au transport actif du sel du sang jusqu'aux tubules. Vous constaterez que le sang circule à contre-courant de la sécrétion saline. En maintenant dans les tubules un gradient de concentration du sel (couleur bleu pâle en dégradé), cet échangeur à contre-courant favorise le transfert du sel du sang jusqu'à la lumière des tubules.

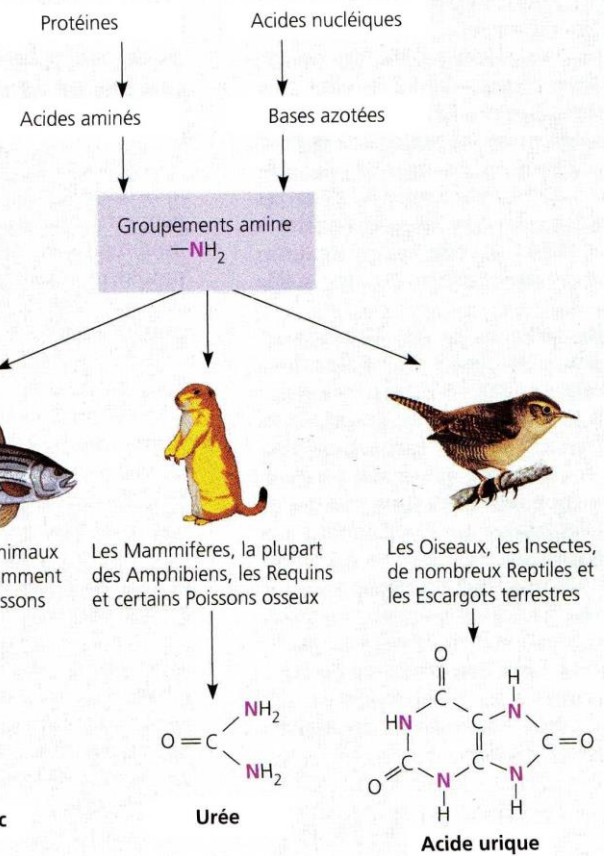


Figure 5: Déchets azotés

Les cellules ont besoin d'un équilibre entre le gain et la perte d'eau par osmose. L'absorption et la perte d'eau doivent être équilibrées par divers mécanismes d'osmorégulation, selon le milieu. Les osmorégulateurs dépensent de l'énergie pour contrôler leur osmolarité interne, tandis que les osmotolérants sont plutôt iso-osmotiques par rapport à leur environnement. Les osmotolérants, qui ne régulent pas leur osmolarité comprennent la plupart des Invertébrés marins. Les osmorégulateurs contrôlent la perte et l'acquisition d'eau dans un milieu hyperosmotique ou hypoosmotique. Les Requins ont une osmolarité légèrement supérieure à celle de l'eau de mer, parce qu'ils conservent de l'urée. Les Poissons osseux marins perdent de l'eau au profit de leur milieu hyperosmotique et boivent de l'eau de mer. Les Vertébrés marins excrètent les sels excédentaires par leurs glandes rectales, leurs branchies, leurs glandes excrétrices de sel ou leurs reins. Les Animaux d'eau douce, qui absorbent constamment de l'eau en provenance du milieu hypoosmotique, excrètent une urine diluée. La perte de sels est remplacée par les sels absorbés dans les aliments, ou bien par le captage d'ions par l'intermédiaire des branchies. Les animaux terrestres combattent la déshydratation par des adaptations comportementales et grâce à des organes d'excrétion conservant l'eau. Ils le font aussi en consommant des liquides et des solides contenant une forte proportion d'eau.

4- La reproduction chez les animaux

La conservation de l'individu et de l'espèce se caractérise par la faculté des êtres vivants à se reproduire. La reproduction asexuée, ou multiplication asexuée, ou encore reproduction agame, se réalise à partir d'un seul individu qui produit à partir de son soma des individus conformes à un parent et identiques entre eux.

Dans la reproduction sexuée, l'individu se développe à partir d'une cellule issue généralement de la fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle haploïdes produits généralement par deux individus de sexe différent et donnant un **zygote** (œuf fécondé) diploïde. Cette reproduction donne naissance à des individus originaux.

Les gamètes se forment par méiose d'une cellule animale. Le gamète femelle, l'**ovule**, est une cellule relativement grosse et immobile. Le gamète mâle, le **spermatozoïde**, est généralement une cellule flagellée beaucoup plus petite.

4.1.-Vue d'ensemble de la reproduction chez les animaux

Pour la grande majorité des animaux, la reproduction est essentiellement ou exclusivement sexuelle. Il existe cependant des espèces qui ont un mode de reproduction principalement asexué, dont quelques espèces, toutes des femelles, chez qui la reproduction est exclusivement asexuée. Parmi celles-ci se trouvent les microscopiques rotifères bdelloïdes ainsi que certaines espèces de lézards téiidés (*Aspidoscelis spp.*).

4.1.1- Les mécanismes de la reproduction asexuée

Certaines formes de reproduction asexuée s'observent uniquement chez les Invertébrés.

La scissiparité est un mécanisme dans lequel le parent se scinde pour donner deux individus de taille à peu près égale comme chez l'anémone de mer (*Anthopleura elegantissima*).

Le bourgeonnement est aussi un mécanisme de reproduction asexuée courant chez les Invertébrés. Dans ce cas, de nouveaux individus se forment à partir d'excroissances à la face externe du parent. Ainsi, chez les coraux durs, le nouvel individu se forme à partir de la surface corporelle du parent et y reste associé, ce qui finira par former une colonie de plus d'un mètre de diamètre et qui contient plusieurs milliers d'individus accolés.

Certains Invertébrés, notamment les Éponges, disposent d'un autre mécanisme de reproduction asexuée: ils libèrent des groupes de cellules variées qui donnent naissance à de nouveaux individus.

La fragmentation, qui se déroule en deux étapes. Au cours de ce processus, le corps se dissocie en plusieurs fragments, qui subissent une *régénération*, durant laquelle les parties perdues se reconstituent. Si plus d'un morceau croît et se développe en un individu complet, il y a reproduction. Par exemple, certains Annélides peuvent se scinder en plusieurs fragments, chacun devenant un ver entier en moins d'une semaine. La reproduction par fragmentation et régénération est possible chez de nombreuses espèces d'Éponges, de Cnidaires, de Polychètes et d'Urocordés.

La **parthénogenèse** (de *parthenos*, qui signifie « vierge ») est un mode de reproduction dans lequel un œuf se développe sans avoir été fécondé. Les Invertébrés tels que certaines espèces d'abeilles, les guêpes et les fourmis se reproduisent par parthénogenèse. La progéniture peut être haploïde ou diploïde. Si les descendants sont haploïdes, ils deviennent des adultes qui fabriquent leurs œufs ou leurs spermatozoïdes sans méiose. Chez les abeilles, les mâles, appelés *faux bourdons*, sont des adultes haploïdes fertiles qui sont nés par parthénogenèse, tandis que les femelles, c'est-à-dire les ouvrières stériles et les femelles reproductrices (reines), proviennent d'œufs fécondés. Parmi les Vertébrés, on a observé la parthénogenèse chez environ une espèce sur mille. Récemment, des gardiens de zoo ont observé la parthénogenèse chez un lézard de grande taille, un varan appelé dragon de Komodo (*Varanus komodoensis*) et chez une espèce de requin-marteau (*Sphyrna tiburo*). Dans les deux cas, les femelles avaient été gardées complètement isolées des mâles de leur espèce, mais elles s'étaient néanmoins reproduites.

4.1.2- Variation des cycles et les types de reproduction chez les animaux

Chez la plupart des animaux, l'activité de reproduction suit un cycle précis qui est souvent associé à des changements saisonniers. Comme la reproduction est périodique, les animaux peuvent économiser leurs ressources et s'y consacrer lorsqu'ils disposent de l'énergie nécessaire, après avoir satisfait leurs besoins vitaux et lorsque les conditions du milieu favorisent la survie des jeunes. Ainsi, les brebis ont un cycle reproducteur de 15 jours au milieu duquel elles ovulent. Les cycles ne surviennent toutefois qu'à l'automne et au début de l'hiver, de sorte que les agneaux naissent à la fin de l'hiver ou au printemps. De même, les animaux qui vivent dans des habitats apparemment stables, sous les tropiques ou dans l'océan par exemple, ne se reproduisent en général qu'à certains moments de l'année. Les cycles reproducteurs sont déterminés par un ensemble de facteurs hormonaux et environnementaux, notamment la température, les précipitations la photopériode et les cycles lunaires.

Les animaux peuvent se reproduire exclusivement par voie asexuée ou par voie sexuée, ou bien passer d'un mode de reproduction à l'autre. Chez les Pucerons, les Rotifères et les Daphnies (Crustacés microscopiques d'eau douce), la femelle peut fabriquer deux sortes d'œufs selon les conditions du milieu, notamment selon la saison. La première catégorie d'œufs est fécondée, tandis que la seconde se forme par parthénogenèse.

La reproduction sexuée pose un problème particulier aux animaux sessiles ou fousseurs, ainsi qu'aux parasites comme les Ténias. En effet, il peut être difficile pour ces animaux de rencontrer un représentant de l'autre sexe. **L'hermaphrodisme** leur offre une solution. Chaque individu possède un appareil génital mâle et un appareil génital femelle. Bien que certains hermaphrodites se fécondent eux-mêmes, la plupart doivent s'accoupler avec un autre individu de l'espèce. Chaque animal joue alors à la fois le rôle du mâle et celui de la femelle, c'est-à-dire qu'il donne du sperme et en reçoit, comme cela se passe chez les Lombrics (*Lumbricus sp.*). Tous les individus rencontrés sont des partenaires potentiels. Ce type d'union permet de produire deux fois plus de descendants que la fécondation des ovules d'un seul individu.

L'hermaphrodisme séquentiel ou successif est un autre type de reproduction remarquable. Il se caractérise par le changement de sexe d'un individu au cours de sa vie. Chez certaines espèces, les individus sont **protérogynes** (d'abord femelles) ; chez d'autres, ils sont **protérandres** (d'abord mâles).

4.1.3- La reproduction sexuée : une énigme dans l'évolution

La reproduction sexuée doit favoriser la production de descendants ou leur survie, sinon elle aurait rapidement disparu.

Quel avantage la reproduction sexuée comporte-t-elle ? La réponse n'est pas claire. La plupart des hypothèses tournent autour des combinaisons génétiques uniques qui dérivent des gènes parentaux lors de la recombinaison méiotique et de la fécondation. En engendrant une progéniture aux génotypes variés, la reproduction sexuée augmente les chances de survie d'une espèce compte tenu des changements relativement rapides de l'environnement (y compris les agents pathogènes). En revanche, on suppose que la reproduction asexuée est plus avantageuse dans les environnements stables et favorables puisqu'elle conserve les génotypes favorables avec fidélité et précision.

4.2- Les mécanismes de la reproduction sexuée

La **fécondation**, c'est-à-dire l'union du spermatozoïde et de l'ovule, joue un rôle important dans la reproduction sexuée. Chez certaines espèces, la fécondation est externe: les œufs sont libérés par la femelle et fécondés par le mâle dans le milieu externe. Chez d'autres, la fécondation est interne: le mâle dépose les spermatozoïdes à l'intérieur ou à l'entrée du système reproducteur de la femelle, de sorte que la fécondation se fait dans l'organisme de cette dernière.

4.2.1- La production et la rencontre des gamètes

La fécondation interne nécessite la collaboration des individus, pour l'accouplement, elle nécessite également des systèmes reproducteurs assez complexes. En effet, il faut non seulement des organes pour l'accouplement, pour transmettre les spermatozoïdes, mais aussi des réceptacles pour entreposer ces spermatozoïdes et les conduire jusqu'aux ovules.

La fécondation externe requiert quant à elle un milieu favorable dans lequel l'œuf peut se développer sans se dessécher ni souffrir d'un excès de chaleur. Elle se produit donc presque exclusivement dans les habitats humides. De nombreux Invertébrés aquatiques libèrent tout simplement leurs œufs et leurs spermatozoïdes dans le milieu externe. La fécondation s'effectue alors sans qu'il y ait contact physique entre les parents. Cependant, il faut que les spermatozoïdes matures rencontrent des ovules murs avec synchronisme.

La plupart des Poissons et des Amphibiens à fécondation externe ont un comportement sexuel qui permet à un mâle de féconder les œufs d'une femelle. Pour les deux individus, la parade constitue un élément déclencheur provoquant la libération des gamètes. Ainsi, d'une part, la fécondation a de meilleures chances de réussir et, d'autre part, le choix du partenaire peut se faire de façon sélective, dans une certaine mesure. Des facteurs extérieurs tels que la température ou la photopériode peuvent aussi déclencher la libération simultanée des gamètes par tous les individus d'une population. Enfin, un individu libérant ses gamètes peut sécréter des substances chimiques qui déclenchent le même comportement chez d'autres individus de la même espèce.

Les phéromones sont des médiateurs chimiques qui, libérés par un individu, influent sur le comportement d'autres individus de la même espèce. Ces petites molécules volatiles ou hydrosolubles se dispersent facilement dans le milieu et, à l'instar des hormones, sont actives en infime quantité. De nombreuses phéromones sont des substances exerçant une attraction sexuelle. Un insecte mâle peut détecter les phéromones d'une femelle de son espèce se trouvant à plus de 1,5 km. La phéromone de la Spongieuse femelle (*Lymantria dispar*) déclenche des réactions chez les mâles dès que sa concentration est de 1 molécule de phéromone parmi 10^{17} molécules d'autres gaz dans l'air.

4.2.2- La protection de l'embryon

Toutes les espèces doivent produire beaucoup de descendants pour que certains d'entre eux survivent assez longtemps et se reproduisent à leur tour. La fécondation externe produit habituellement un très grand nombre de zygotes. Mais la proportion de ceux qui survivent et poursuivent leur développement s'avère souvent très faible. La fécondation interne, quant à elle, fournit généralement un nombre moins élevé de zygotes. Toutefois, les embryons bénéficient d'une plus grande protection, et les jeunes, de soins parentaux. Parmi les principaux mécanismes de protection figurent la production de coquilles d'œufs résistantes, le développement de l'embryon dans le système reproducteur de la femelle et la protection des œufs et des jeunes par les parents.

De nombreuses espèces d'animaux terrestres pondent des œufs capables de résister à un milieu hostile. Les Oiseaux, les Reptiles et les Monotrèmes pondent des œufs amniotiques dont la coquille, constituée de calcium et de protéines, empêche les pertes d'eau et les dommages physiques. En comparaison, les œufs des Poissons et des Amphibiens ne sont dotés que d'un revêtement gélatineux.

Au lieu de se développer dans une coquille protectrice, l'embryon de nombreux animaux se développe dans le système reproducteur de la femelle. Parmi les Mammifères, les Marsupiaux comme les Kangourous et les Opossums abritent l'embryon dans leur utérus pendant un court laps de temps. L'embryon rampe ensuite seul jusqu'à l'extérieur, pour terminer son développement fœtal accroché à une glande mammaire, dans la poche ventrale (marsupium) de la mère. Les embryons des Mammifères placentaires, quant à eux, se développent entièrement à l'intérieur de l'utérus. Les nutriments qui leur sont nécessaires leur viennent de la circulation sanguine maternelle par l'intermédiaire d'un organe particulier appelé placenta.

Un petit kangourou sortant du marsupium de sa mère pour la première fois ou un bébé humain venant au monde ne sont pas encore en mesure de vivre de façon indépendante. On sait bien que les Oiseaux nourrissent

leurs oisillons et que les Mammifères donnent la tétée. Mais les Animaux qui dispensent des soins à leurs petits sont beaucoup plus nombreux qu'on ne le pense. Cela se présente souvent sous une forme inattendue. Ainsi, chez une espèce de Grenouille d'Amérique du Sud, le Rhinoderme de Darwin (*Rhinoderma darwirlui*), le mâle transporte les têtards dans son sac vocal hypertrophié jusqu'à ce qu'ils se métamorphosent et sortent d'eux-mêmes du sac sous leur forme définitive. On connaît également de nombreux cas de soins prodigués par les parents chez les Invertébrés.

4.2.3- Diversité des systèmes reproducteurs

La reproduction sexuée requiert la présence de systèmes qui sont capables d'effectuer la gamétogenèse et qui facilitent la rencontre des gamètes des deux sexes. Ces systèmes reproducteurs présentent une grande diversité. Les plus simples ne comportent même pas de gonades, organes qui élaborent les gamètes chez la plupart des Animaux. Les plus complexes comportent plusieurs ensembles de conduits et de glandes annexes qui transportent et protègent les gamètes de même que les embryons en cours de développement.

Parmi les systèmes reproducteurs les plus simples, on trouve celui des Polychètes (embranchement des Annélides). Bien qu'ayant des sexes séparés, la plupart des Polychètes ne possèdent pas de gonades à proprement parler. Les ovules et les spermatozoïdes proviennent de cellules indifférenciées qui tapissent le coelome. Au fur et à mesure que les gamètes arrivent à maturité, ils se détachent de la paroi corporelle et remplissent le coelome. Selon l'espèce, les ouvertures du système urinaire libèrent les gamètes parvenus à maturité, ou bien le gonflement de la masse d'œufs fait éclater l'individu, ce qui provoque sa mort et l'éparpillement des œufs dans le milieu externe.

La plupart des Insectes ont des sexes séparés et des systèmes reproducteurs. Chez le mâle, les spermatozoïdes sont produits par deux testicules et cheminent dans un conduit sinueux vers les vésicules séminales, où ils sont entreposés. Pendant l'accouplement, ils sont éjaculés dans le système reproducteur de la femelle. Les ovules de la femelle passent des ovaires (au nombre de deux) aux oviductes, puis se déposent dans le vagin, où s'effectue la fécondation. Chez de nombreuses espèces, le système reproducteur de la femelle comporte également une spermathèque, sac qui permet d'entreposer les spermatozoïdes durant une année ou plus.

Les systèmes reproducteurs des Vertébrés présentent une structure générale assez semblable, mais également quelques variantes importantes. Ainsi, chez de nombreux Vertébrés autres que les Mammifères, les systèmes digestif, urinaire et reproducteur ont tous la même ouverture, à l'extrémité postérieure du corps: **le cloaque**. Il en était probablement de même chez les ancêtres des Vertébrés. Par contre, chez la plupart des Mammifères, le système digestif possède sa propre ouverture, à l'extrémité postérieure du corps. De plus, la plupart des femelles ont des ouvertures distinctes pour les systèmes urinaire et reproducteur. Chez la plupart des Vertébrés, l'utérus comporte deux branches pour le développement des embryons. Chez Humains et les autres Mammifères dont l'utérus n'abrite qu'un petit nombre d'embryons à la fois, mais aussi chez les Oiseaux et de nombreux Serpents, l'utérus ne comporte qu'une cavité pour le développement embryonnaire.