

**IUT GENIE BIOLOGIQUE  
LA ROCHE SUR YON**

**ANNEE 2005-06**

**SYSTEMATIQUE ANIMALE  
PHYSIOLOGIE COMPAREE**

**Myriam BOU**

## PLAN

### Chapitre 1 : Squelettes et locomotion

#### 1- Types de squelette et rôle dans la locomotion

1-1- Hydrosquelette

1-2- Exosquelette

1-3- Endosquelette

#### 2- Nage en milieu aquatique

2-1- Contraintes en milieu aquatique

2-2- Animaux pratiquant la nage

2-2-1- Annélides polychètes

2-2-2- Les poissons

2-2-3- Les mammifères aquatiques

2-3- Animaux pratiquant la réaction

2-3-1- Les mollusques céphalopodes

2-3-2- Les crustacés décapodes

#### 3- Marche sur un substrat

3-1- Contraintes physiques liées à la marche

3-2- Animaux qui pratiquent la marche

3-2-1- Chez les insectes

3-2-2- Chez les vertébrés

3-3- Autres modes de locomotion sur un substrat

3-3-1- La course

3-3-2- Le saut

3-3-3- Le fouissage

3-3-4- La reptation

#### 4- Le vol en milieu aérien

4-1- Contraintes du milieu aérien

4-2- Animaux pratiquant le vol battu

4-2-1- Les insectes

4-2-2- Les oiseaux

4-2-3- Les mammifères

#### 2- Les organes d'échanges gazeux avec l'environnement

2-1- Respiration tégumentaire en milieu aqueux

2-2- Respiration branchiale en milieu aqueux

2-3- Respiration pulmonaire en milieu aérien

2-4- Respiration trachéenne des insectes

#### 3- Les pigments respiratoires

#### 4- La circulation du milieu intérieur

4-1- Les systèmes primitifs

4-2- Système circulatoire ouvert

4-3- Système circulatoire clos

### Chapitre 2 : Circulation et respiration

#### 1- Phénomènes physiques sous-tendant les échanges gazeux

1-1- Influence des caractéristiques du milieu de vie

1-2- Phénomènes de diffusion

## **Chapitre 3 : Nutrition et alimentation**

- 1- Structure des appareils digestifs**
- 1-1- Les systèmes digestifs peu évolués
- 1-2- Diversité des tubes digestifs antérieurs
  - 1-2-1- Cas des annélides
  - 1-2-2- Cas des insectes
  - 1-2-3- Cas des vertébrés
- 1-3- Spécialisation du tube digestif postérieur**
- 2- Les grands types de comportements alimentaires**
- 2-1- La microphagie
  - 2-1-1- Microphagie avec courant d'eau
  - 2-1-2- Microphagie sans courant d'eau
  - 2-1-3- L'osmotrophie
- 2-2- La phytophagie
  - 2-2-1- Adaptation de la prise alimentaire
  - 2-2-2- Problèmes physiologiques de la phytophagie
- 2-3- La prédation
  - 2-3-1- La prédation sans outil
  - 2-3-2- Outils liés à des modifications du tube digestif antérieur
  - 2-3-3- Les outils indépendants du tube digestif

## **Chapitre 4 : Excrétion et osmorégulation**

- 1- Les types d'excrétion en fonction du milieu**
- 1-1- Les différents types de déchets azotés
- 1-2- Les différents types d'osmorégulation
  - 1-2-1- L'osmorégulation en milieu marin
  - 1-2-2- L'osmorégulation en milieu dulcicole
  - 1-2-3- L'osmorégulation en milieu aérien
- 2- Les organes qui permettent l'excrétion**
- 2-1- Les métanéphridies des Annélides
- 2-2- La glande verte de l'écrevisse
- 2-3- Les tubes de Malpighi des insectes
- 2-4- Le rein des vertébrés
- 2-5- Les branchies des poissons

## **Chapitre 5 : La thermorégulation**

- 1- Equilibre thermique avec le milieu ambiant chez un homéotherme**
- 2- Efficacité des réponses thermorégulatrices chez les homéothermes stricts
  - 2-1- Dans une ambiance froide
  - 2-2- Dans une ambiance chaude
  - 2-3- Régulation des réponses thermorégulatrices
- 3- Régulation de la température chez les hétérothermes**

# Chapitre 1 : Squelettes et locomotion

Les animaux sont hétérotrophes ce qui signifie qu'ils doivent trouver dans le milieu de quoi se nourrir. Deux cas sont possibles :

- soit la nourriture est apportée à l'animal : animaux fixés.
- soit l'animal se déplace : animaux vagiles.

C'est dans ce dernier cas que se place la locomotion.

Plusieurs types de milieux ont été colonisés par les animaux :

- milieu aquatique : les animaux peuvent être nageurs, marcheurs ou fousseurs.
- milieu terrestre : les animaux peuvent être marcheurs, fousseurs ou volants.

Suivants les cas, les milieux n'ont pas les mêmes caractéristiques physiques ce qui implique notamment des différences au niveau des systèmes de locomotion.

Pour que le déplacement soit possible, l'animal doit réaliser deux conditions :

- présence d'un squelette qui sert de support et qui présente des parties mobiles.
- présence de muscles pour mobiliser le squelette.

## 1- Types de squelette et rôle dans la locomotion

Le squelette assure trois fonctions : le soutien, la protection et le mouvement. La plupart des Animaux terrestres s'affaîsseraient sous leur propre masse s'ils n'avaient pas de squelette pour les soutenir. Un Animal aquatique même ne serait qu'une masse informe sans une structure pour lui donner sa configuration. De nombreuses espèces possèdent un squelette rigide qui protège leurs tissus mous. Chez les Vertébrés, par exemple, le crâne recouvre l'encéphale, et les côtes forment une cage autour du cœur, des poumons et des autres organes internes. De plus, le squelette participe au mouvement puisqu'il procure aux muscles un point d'appui ferme.

### 1-1- Hydrosquelette

Un hydrosquelette se compose d'un liquide maintenu sous pression dans un compartiment fermé de l'organisme. Ce type de squelette se retrouve chez la plupart des Cnidaires, des Plathelminthes, des Némathelminthes et des Annélides. Ces Animaux bougent et se déplacent en se servant de leurs muscles afin de modifier la forme de compartiments remplis de liquide.

Chez les Vers de terre, le liquide cœlomique sert d'hydrosquelette. La cavité cœlomique est divisée par des cloisons situées entre les segments, et le Ver peut ainsi modifier la forme de chacun des segments séparément au moyen de ses muscles circulaires et longitudinaux.

Les hydrosquelettes ne fournissent aucune protection, et ils n'offriraient aucun soutien à un Animal terrestre de grande taille.

### 1-2- Exosquelette

L'exosquelette est une enveloppe rigide déposée à la surface du corps de l'Animal. Par exemple, la plupart des Mollusques sont enfermés dans une coquille calcaire sécrétée par le manteau, c'est-à-dire un prolongement de la paroi corporelle en forme d'enveloppe. Au fur et à mesure que l'Animal grossit, il agrandit le diamètre de la coquille en élargissant la marge extérieure. Les Palourde et les autres Bivalves ferment leur coquille, qui est articulée, en actionnant les muscles situés à l'intérieur de cet exosquelette.

L'exosquelette articulé que l'on retrouve le plus souvent chez les Arthropodes est une cuticule, c'est-à-dire une enveloppe inerte sécrétée par l'épiderme. Les muscles sont fixés aux excroissances et aux plaques situées sur la face interne de la cuticule. Environ 30 à 50 % de la cuticule se composent de chitine. Une matrice protéique enrobe les fibrilles de chitine, qui forment ainsi un matériau composite analogue à la fibre de verre, alliant la solidité à la flexibilité. Aux endroits où la protection s'avère la plus importante, la cuticule est durcie par l'ajout de composés organiques appelés quinones, qui établissent des liens transversaux entre les protéines de l'exosquelette. Chez certains Crustacés comme les Crabes certaines parties de l'exosquelette sont aussi renforcées par la présence de sels de calcium. Par contre, à la hauteur des articulations des pattes, où la cuticule doit rester mince et flexible, on ne trouve que de petites quantités de sels inorganiques et peu de liens entre les protéines.

### **1-3- Endosquelette**

L'endosquelette se compose d'éléments de soutien rigides, tels des os, que les tissus mous de l'Animal entourent.

Les échinodermes sont pourvus d'un endosquelette, soit un ensemble de plaques rigides situées sous la peau. Les plaques sont habituellement soudées entre elles par des fibres de protéine.

L'endosquelette des Cordés se compose de tissu cartilagineux, de tissu osseux, ou d'une combinaison quelconque de ces deux matériaux. Le squelette des Mammifères comporte plus de 200 os, certains fusionnés et d'autres reliés par des articulations pourvues de ligaments, qui offrent une certaine liberté de mouvement. Du point de vue anatomique, on distingue chez les vertébrés le squelette axial et le squelette appendiculaire.

Outre leur fonction de soutien à l'organisme, les os du squelette des vertébrés agissent comme des leviers lors de la contraction des muscles auxquels ils sont reliés.

Les modes de locomotion animale varient. Plusieurs embranchements animaux comprennent des espèces qui se déplacent au moyen de la nage. Sur terre et dans les sédiments du fond de la mer et des lacs, les Animaux rampent, marchent, courent ou sautillent. Les organes du vol ne sont apparus que dans quelques classes, chez les Insectes et chez les Reptiles, les Oiseaux et les Mammifères.

Quel que soit leur mode de déplacement, les Animaux doivent exercer une force suffisante sur leur environnement pour vaincre la friction et la gravitation. L'importance relative de ces deux sources de résistance dépend du type de milieu.

## **2- Nage en milieu aquatique**

La nage est un mode de déplacement lié au milieu aquatique. Nous ne parlerons dans cette partie que des animaux faisant partie du necton (animaux qui nagent), ceux faisant partie du benthos (animaux du fond seront traités avec la marche).

### **2-1- Contraintes en milieu aquatique**

Dans la nage, le transfert des forces de l'animal à son environnement consiste à refouler un certain volume d'eau dans le sens inverse à la progression. Ce refoulement est effectué par une portion plus ou moins importante du corps, qui joue le rôle d'un propulseur. La réaction de l'eau mobilisée est à l'origine de la force propulsive.

Les propriétés fondamentales de l'eau qui interviennent dans l'hydrodynamique sont les suivantes :

- la masse de l'eau.

- la viscosité : c'est une mesure de la résistance à la déformation. La résistance à l'avancement est proportionnelle à la vitesse du solide et à la viscosité du fluide.

- la densité : celle de l'eau est d'environ 1000 kg/m<sup>3</sup>. Elle est très légèrement supérieure pour l'eau de mer en raison des sels dissous. Les animaux ont des densités supérieures à celle de l'eau d'où la nécessité de mettre en place des mécanismes pour ne pas couler. Le premier mécanisme possible est le mouvement permanent (Thon). Un deuxième consiste à accumuler de la graisse au niveau du foie de certains requins pour diminuer leur densité (la graisse a une densité inférieure à 1000 kg/m<sup>3</sup>). Enfin, chez les Téléostéens (poissons osseux), l'accumulation de gaz dans les vessies gazeuses permet d'adapter leur densité à celle du milieu et ce en fonction de la profondeur, ce sont des organes de flottaison. Les poumons des Mammifères aquatiques jouent le même rôle.

Par contre, les effets de pression peuvent être négligés en raison de la nature incompressible de l'eau. Néanmoins, les gaz contenus à l'intérieur des animaux varient en volume.

Les forces qui déterminent le type d'écoulement autour du corps de l'animal en mouvement dans l'eau, sont étroitement liées à la taille et à la vitesse de l'animal, mais aussi aux propriétés physiques du fluide. Deux types de forces freinent le mouvement : la viscosité et l'inertie. L'influence de la viscosité domine pour des corps de petite taille avec des vitesses lentes. L'influence de l'inertie augmente pour des corps de grande taille se déplaçant à des vitesses élevées. De ce fait, les animaux aquatiques ont besoin de fortes masses musculaires pour se mouvoir.

La traînée est à l'origine du mouvement. C'est l'unique force qui s'exerce sur un corps symétrique qui se déplace selon son axe de symétrie. Elle a la même direction que le mouvement mais un sens opposé. Lorsque le corps est asymétrique ou que le mouvement du corps fait un angle avec l'axe de symétrie, une deuxième force entre en jeu : la force ascensionnelle (portance).

POUSSEE = Traînée + Force ascensionnelle + Réaction à l'accélération + Réaction à la pression sur le fond

## **2-2- Animaux pratiquant la nage**

### **2-2-1- Annélides polychètes**

Chez les polychètes errants, la nage est associée à une ondulation du corps et à des mouvements des parapodes. Deux types de muscles orientent les parapodes ce qui va permettre le mouvement. Les parapodes sont amenés vers l'avant par contraction des muscles antérieurs puis ensuite vers l'arrière par contraction des muscles postérieurs. Tous les parapodes sont synchrones.

### **2-2-2- Les poissons**

Il existe trois modes de nages essentiels chez les Poissons qui tous correspondent à une forme préférentielle : poissons adaptés à la manœuvre, à la nage soutenue, à l'accélération. La plupart des poissons sont généralistes et par conséquent occupent des positions intermédiaires. Néanmoins, aucun poisson ne réunit toutes les caractéristiques pour en faire un bon spécialiste. D'autres contraintes interviennent sur la forme du corps. Ainsi le Brochet a un profil du corps qui trahit un compromis entre la locomotion et la détection par la proie.

Chez les poissons qui nagent en permanence, un étranglement au niveau de la queue leur permet de diminuer les effets des forces latérales : cas du Thon. Cette adaptation permet de plus une diminution notable des frottements.

Les trois types de spécialités s'excluent les uns des autres, un poisson ne pouvant pas être un bon spécialiste dans les trois types. Chez les poissons, les nageoires qui ne servent pas à la propulsion permettent de réaliser des manœuvres.

### 2-2-3- Les mammifères aquatiques

La plupart des cétacés ont un mode de locomotion de type oscillatoire axial. Les membres sont réduits et ne servent qu'à stabiliser l'animal.

Seules les Otaries se servent de leurs membres antérieurs pour nager : mode oscillatoire pectoral. Les mouvements des nageoires sont synchrones. Les membres postérieurs n'ont aucun rôle en nage rectiligne.

## 2-3- Animaux pratiquant la réaction

Ce sont des mouvements le plus souvent liés à la fuite. Les animaux qui la pratiquent possèdent généralement par ailleurs un autre type de locomotion.

### 2-3-1- Les mollusques céphalopodes

Lors d'attaques par des prédateurs, les céphalopodes peuvent brusquement vider l'eau contenue dans la cavité palléale par le siphon exhalant. Cela leur permet de reculer très rapidement et donc de fuir. Cette réaction est le plus souvent liée à une aspersion d'encre afin d'échapper au contrôle visuel du prédateur.

De nombreux lamellibranches possèdent un système analogue (Coquille St Jacques).

### 2-3-2- Les crustacés décapodes

Chez les décapodes, de brusques contractions des muscles de l'abdomen permettent à la queue de se replier et de propulser l'animal en arrière : cas de l'écrevisse. Les muscles à l'origine de ce mouvement sont innervés par des nerfs de gros diamètre ce qui permet une réponse rapide lors de la fuite.

## 3- Marche sur un substrat

Les déplacements sur un substrat peuvent s'effectuer en milieu aquatique sur le fond ou en milieu terrestre. Nous commencerons par étudier la marche qui est le cas le plus commun avant de voir comment elle est déclinée dans tous les milieux.

### 3-1- Contraintes physiques liées à la marche

La locomotion en milieu terrestre doit prendre en compte la gravité : soit en l'utilisant, soit en y résistant. L'animal doit soutenir son corps par un nombre variable de points d'appui. Il utilise ces appuis pour exercer une force sur le substrat, qui est à l'origine d'une force propulsive.

La force produite par un corps reposant sur une surface horizontale :  $F_p$

$F_p = M \times g$      $M$ : masse de l'animal     $g$  : gravité

Trois paramètres sont fondamentaux dans la locomotion terrestre :

La gravité à l'origine d'une force pondérale.

La poussée réalisée par l'animal.

Le frottement qui détermine si l'animal glisse ou possède un point d'appui.

L'animal peut contrôler, par la tension des muscles qui meuvent les articulations de ces membres, la force créée le long de leur axe mécanique qu'il transmet au substrat.

### 3-2- Animaux qui pratiquent la marche

On trouve des animaux pratiquant la marche entre autres chez les Arthropodes et chez les Vertébrés.

#### 3-2-1- Chez les insectes

Les insectes possèdent 6 pattes et par conséquent 6 points d'appuis. Les mouvements ne sont possibles que parce que les pattes sont articulées ce qui permet d'obtenir des forces obliques par rapport au sol et donc un mouvement vers l'avant.

La plupart des insectes utilisent leurs 6 pattes lors du déplacement mais seules les 4 premières fonctionnent lors des déplacements lents. Quand ils vont plus vite, ils utilisent leurs 6 pattes. Le mouvement se fait selon deux triangles formés par les pattes antérieure et postérieure d'un côté, et la patte du milieu de l'autre côté. Cela permet aux insectes de se déplacer en droite ligne sans avoir une élévation importante du corps.

La séquence de déplacement des pattes est la suivante : D1, G2, D3, G1, D2, G3.

#### 3-2-2- Chez les vertébrés

Chez les vertébrés, le membre de base est de type chiridien. Il a subi de fortes adaptations à la marche, mais aussi à d'autres types de déplacements y compris la nage ou le vol.

##### a- Le membre chiridien

Il apparaît au Dévonien supérieur et permet le passage de la vie aquatique à la vie terrestre des Vertébrés. Les étapes du passage de la nageoire du poisson (type ossoptérygien) au membre chiridien ne sont pas encore élucidées.

Il comprend trois segments articulés :

- segment proximal ou stylopode : il est composé d'un os, le fémur (bras) ou le tibia (cuisse).
- segment moyen ou zeugopode : il est composé de 2 os, radius et ulna (avant bras) ou tibia et fibula (jambe).
- segment distal ou autopode : il représente la main ou le pied. Il est divisé en trois sous régions fonctionnant comme un ensemble articulé :
  - basipode : il est composé de 10 os environ, carpes (poignet) ou tarses (cheville).
  - métapode : il est composé de 5 os, métacarpe (paume de la main) ou métatarses (plante du pied).
  - acropode : il est composé par les phalanges des 5 doigts.

L'évolution du membre chiridien s'accompagne d'un renforcement des ceintures en particulier la ceinture pectorale. La base hypothétique était vraisemblablement de type horizontal et fonctionnait comme une rame sans supporter le corps.

Le plus ancien type connu est le membre transversal, il se replie en Z et soulève l'animal de la hauteur du zeugopode. Les membres transversaux impliquent un soulèvement de l'animal lors des déplacements ce qui est très coûteux en énergie. Le membre est perpendiculaire à l'axe du corps. Ce type de membre est présent jusque chez les reptiles.

Le membre dressé parasagittal apparaît chez les dinosaures, les oiseaux et les mammifères. Le membre, parallèle à l'axe du corps, agit comme un ressort dont la longueur est conditionné par l'état de contraction et d'élasticité des muscles reliant les divers segments. Le soulèvement du corps ne demande plus qu'un faible dépense d'énergie et l'enjambée s'accroît.



Pour passer du membre transversal au membre parasagittal en théorie, il suffit de faire pivoter le stylo-pode de 90°. Cette rotation s'est faite vers l'avant pour le membre postérieur, vers l'arrière pour le membre antérieur. Pour le membre antérieur, on a de plus, une torsion de la zygospore qui ramène les doigts vers l'avant. La position de l'autopode des Mammifères, paume tournée vers le sol est appelée pronation. Beaucoup de primates sont capables de ramener la paume vers le ciel : supination.

#### b- La marche

##### \*\* Chez les quadrupèdes

L'animal recherche au maximum un appui tripode pour assurer une bonne stabilité mais ce n'est ce qui lui assure la meilleure manœuvrabilité. Ils doivent donc chercher un compromis entre les deux.

La marche est un déplacement séquentiel dans le temps et dans l'espace :

- chaque membre passe par deux phases répétitives, le posé et le levé, correspondant à des phases de contact et de non contact avec le substrat.

- la durée du cycle de mouvements (posé + levé) est la même pour chacun des quatre membres.

- au cours d'un cycle de révolution, les mouvements des 4 membres se succèdent dans l'ordre de leur entrée en action.

- le déplacement est diagonal, c'est à dire qu'au cours d'un demi-cycle de révolution, deux membres diagonaux se succèdent.

La marche est une allure symétrique, c'est à dire que les temps de poser et de lever sont identiques et représentent 50% du cycle. Il en est de même pour le trot et l'amble.

##### \*\* Chez les bipèdes

Ils se trouvent principalement chez les Oiseaux et l'Homme.

Le corps des vertébrés repose entièrement sur les membres postérieurs. La progression résulte de la répétition des mouvements, synchrones ou alternés de ces membres postérieurs.

Les membres antérieurs, libérés de leur fonction de locomotion terrestre sont disponibles pour d'autres activités (vol des oiseaux, multifonctions de la main chez l'Homme).

### **3-3- Autres modes de locomotion sur un substrat**

Certains exemples ci-après ne sont pas en milieu terrestre, mais en milieu aquatique ou arboricole. Ils correspondent toujours à un déplacement sur un substrat rigide.

#### 3-3-1- La course

Nous ne prendrons qu'un exemple chez les mammifères : le cheval.

Le galop est l'allure associée à la course. C'est une allure asymétrique, le décalage de temps qui sépare le début des posés du membre antérieur et différent de celui qui sépare le début des posés des membres postérieurs.

L'accroissement de la vitesse de progression est associé au perfectionnement des allures asymétriques.

Des caractéristiques structurales favorisent une grande enjambée et une haute fréquence d'oscillation des membres : augmentation de leur longueur, grande mobilité des articulations proximales (épaule et hanche), masses musculaires réduites distalement, au niveau le plus mobile, et concentrées près du corps.

Les mouvements de l'axe vertébral amplifient ceux des membres.

L'adaptation des membres à la course se traduit chez les mammifères de la façon suivante :

- allongement des membres : la longueur de l'enjambée est en effet un facteur essentiel de vitesse. Il intéresse surtout le zeugopode et le métapode.

- relèvement progressif de l'autopode : les plantigrades pratiquent la marche, les digitigrades pratiquent la semi-course (trot), les onguligrades sont capables de maintenir un galop, le membre ne touche plus le sol que par la dernière phalange entourée par un sabot corné.

- la réduction du nombre de doigts est particulièrement nette chez les ongulés. Les Artiodactyles ont 4 (Hippopotames) ou 2 (Chameau) doigts. Les Périssodactyles ont 3 (Tapirs) ou 1 (cheval) doigts.

### 3-3-2- Le saut

Le saut peut être un moyen occasionnel ou l'unique moyen de déplacement.

Le ou les mouvements de parties du corps permettent à l'animal de cesser son appui pour s'élever et se projeter à distance.

La propulsion est assurée par les membres antérieurs et/ou postérieurs. L'extension de ces membres produit l'impulsion nécessaire à la propulsion. L'énergie emmagasinée dans les tissus élastiques produit une force indispensable au décollage. La queue peut intervenir.

Comparaison Criquet-Grenouille : Le membre postérieur se partage en trois segments subégaux avec des mouvements de flexion extension. Cela s'accompagne d'un renforcement de la musculature au niveau de la ceinture.

### 3-3-3- Le fouissage

Le sol représente une autre source de nourriture disponible. De plus, il peut représenter une zone de refuge. Le fouissage ne devient un mode de locomotion que lorsque l'animal mène une existence souterraine. Ce mode de vie est alors associé à une faible pression de prédation, des ressources alimentaires relativement abondantes, des individus dispersés, de l'obscurité, une forte hygrométrie et un tamponnement thermique.

A cela s'ajoute un facteur essentiel pour la locomotion : la résistance mécanique au déplacement. Les fousseurs intègrent dans un mécanisme global une double fonction : vaincre la résistance de l'environnement et se propulser.

Il existe de nombreuses solutions morfo-fonctionnelles, compte tenu de la différence des substrats, de l'origine des groupes et de la nature de l'outil. Les mouvements de creusement, auxquels participent donc de grands ensembles de l'organisme, sont cycliques et comprennent une phase de creusement accumulation et une phase d'évacuation.

Exemples : arénicoles, mollusques fousseurs, taupes.

### 3-3-4- La reptation

La locomotion se fait sur un substrat sans l'aide des membres. La totalité de la partie du corps en contact avec le sol sert de point d'appui. Le corps doit avoir une rigidité suffisante pour pouvoir transmettre le mouvement.

#### a- Chez les annélides

Chez le Lombric ce sont des variations de pression du squelette hydrostatique qui permettent à l'animal d'avancer, la queue ou la tête servant alternativement de point d'ancrage.

**b- Chez les serpents****Progression en accordéon**

Ce mode de locomotion repose sur l'utilisation du frottement statique : des portions du corps en appui sur le substrat permettent le déplacement d'autres parties adjacentes, qui sont poussées ou tirées. De ce fait (document 16) :

- les zones mobiles sont en général sinueuses, tandis que les zones en appui sont rectilignes.

- au fur et à mesure que l'animal progresse vers l'avant, les appuis se déplacent vers l'arrière de son corps.

- chaque point du corps est successivement en appui mobile.

La peau des serpents a des coefficients de frottement variables suivant qu'ils portent ou non des écailles. Cela leur permet donc d'avoir des points d'appuis. Une onde de contraction parcourt le corps d'avant en arrière permettant de créer la poussée.

**4- Le vol en milieu aérien**

Il y a eu deux étapes dans l'acquisition du vol :

tout d'abord un perfectionnement du saut qui a conduit au vol plané.

Ensuite une réalisation du vol actif qui a conduit au vol battu.

**4-1- Contraintes du milieu aérien**

Pour progresser dans l'air l'animal doit déplacer un certain volume d'air, dans le sens inverse de sa progression.

La masse volumique de l'air est de 1,2 g/l. Elle dépend des conditions de pression et de température. Comme pour le milieu aquatique, les animaux sont confrontés aux facteurs suivants : pression, densité, viscosité. Il faut y ajouter les courants thermiques aériens.

Pour faire face aux contraintes physiques de l'environnement aérien et produire une force ascensionnelle susceptible d'équilibrer le poids de son corps et le propulser, l'animal doit développer :

- un système membraneux, unissant des parties du squelette, plus ou moins associé à des modifications profondes de la structure des membres antérieurs.

- une certaine rigidité du corps pour le vol battu, qui n'est pas nécessaire au vol plané.

- un profil aérodynamique. Le corps s'allonge selon son axe longitudinal, pour assurer une bonne pénétration de l'air.

- une nouvelle répartition des masses corporelles. La masse corporelle est liée au développement des surfaces membraneuses. Elle est concentrée au niveau du corps et minimale au niveau des extrémités du corps et du système membraneux.

Chez les vertébrés cela s'accompagne d'une spécialisation des phanères.

L'air tend à s'opposer aux mouvements du solide et les freine d'autant plus, qu'ils sont rapides. Le déplacement d'un corps dans l'air fait naître des forces de résistances.

Lors du déplacement d'un corps, il se produit des forces de frottements. Si la vitesse du corps n'est pas trop faible, l'air est comprimé à l'avant, déprimé à l'arrière. Une forme fuselée permet de limiter ces phénomènes et d'éviter les turbulences.

Lorsque l'aile se déplace avec un angle par rapport au déplacement, le bord d'attaque de l'aile situé à l'avant subira le maximum de la résistance de l'air. La résistance de l'air peut être décomposée en deux :

- la traînée parallèle à la vitesse.

- la portance perpendiculaire à la vitesse.

Si le bord d'attaque de l'aile est surélevé (fait un angle positif avec la vitesse), la portance tend à soulever l'aile. Si l'aile est profilée, la traînée diminue au profit de la portance, ce qui renforce la stabilité du vol : la sustentation d'une même charge exigera une puissance motrice plus faible.

#### **4-2- Animaux pratiquant le vol battu**

Ces animaux appartiennent à trois groupes systématiques (insectes, oiseaux, mammifères) qui ont adoptés des stratégies différentes à partir des mêmes contraintes.

##### 4-2-1- Les insectes

Les insectes sont capables de battre des ailes jusqu'à 1000 fois par seconde, fréquence qu'aucun muscle de vertébré n'est capable de fournir (oiseaux mouches 90 fois/seconde).

Il existe deux types d'insectes volants :

- ceux qui battent des ailes grâce à une musculature alaire directement attachée à la base des ailes. Les contractions sont rythmées par le système nerveux central. Ils ont des fréquences inférieures à 100 fois/seconde. Ce sont des insectes synchrones. Cas de la Libellule.

- ceux qui utilisent une machinerie beaucoup plus compliquée pour battre des ailes : l'aile est reliée au thorax mais c'est le thorax qui se déforme rythmiquement sous l'action de muscles appelés muscles indirects du vol. Les déformations sont transmises à l'articulation thorax-aile et de là à l'aile. Ces muscles sont doublés de petits muscles qui ont un rôle régulateur et qui contrôlent la manière dont l'énergie est transmise. Ces insectes ont des fréquences de battements d'aile supérieures à 100 fois/seconde. Ce sont des insectes asynchrones. Cas de la mouche.

Les insectes sont donc d'excellents voiliers et sont capables d'effectuer des vols de précisions ou des vols de longue durée.

##### 4-2-2- Les oiseaux

La pratique du vol est accompagnée d'un certain nombre de modifications de l'organisation des oiseaux en particulier au niveau du membre antérieur : l'aile.

Les modifications ne portent pas uniquement sur l'aile mais aussi sur d'autres parties de l'organisme :

- développement de la cage thoracique et du sternum.
- rigidification de portions de l'axe vertébral.
- allongement des pièces de la ceinture pelvienne.
- gracilité et pneumatisation des os.

Les oiseaux sont adaptés à deux types de locomotion : vol en milieu aérien et bipédie sur la terre. Le corps prend une forme fuselée et gracile. Des modifications morphologiques importantes concernent le membre antérieur, mais aussi de nombreux autres constituants corporels comme la colonne vertébrale et les ceintures.

Les mouvements de l'aile sont assurés par l'épaule. Les articulations du coude et du poignet permettent d'augmenter et ou de diminuer la surface alaire.

Les os de l'aile sont fortement modifiés : il ne reste que les doigts 2 à 4, le cubitus est plus robuste que le radius, l'humérus a une grande liberté de mouvement. Ce sont néanmoins les plumes qui forment la majeure partie de la surface portante.

La plume constitue la plus grande nouveauté de l'organisation structurale : formation tégumentaire dépourvue de cellules vivantes, très kératinisée et minéralisée. La structure donne une grande cohérence à la partie de la plume qui est exposée à l'air. Différents types de plumes recouvrent tout le corps.

Le pectoral est le principal muscle moteur du vol. Il abaisse l'aile. Il unit l'humérus à l'ensemble sternum-clavicule (soudés).

Le vol actif est réalisé par des mouvements complexes de l'aile.

Pendant l'abaissement de l'aile, la force dynamique résultante est dirigée vers la haut et l'avant : poussée. Les plumes primaires sont courbées dans la direction de cette force pour faciliter le déplacement. Pour freiner, l'aile est partiellement fléchie pendant l'élévation.

La phase d'élévation est plus rapide que la phase d'abaissement : 60 % du vol du pigeon correspond à la phase d'abaissement. Chaque battement décrit une boucle elliptique qui induit la force qui permet une progression constante. Les autres muscles permettent l'orientation de l'aile pour orienter le mouvement.

Les oiseaux économisent de l'énergie en planant et en profitant des divers courants aériens. Le rendement sans planer est de 0,19.

#### 4-2-3- Les mammifères

Cela concerne les Chiroptères. Chez ces mammifères, l'aile est soutenue par les quatre doigts de la main. A l'aile s'associe un système de sonar pour la détection des proies et des obstacles.

L'aile est relativement grande par rapport à la taille de l'animal.

L'aile est soutenue par les os du bras, de l'avant bras et par quatre doigts de la main très allongés. La structure du patagium est complexe. Elle comprend plusieurs parties délimitées par les formations osseuses.

La réduction du poids de l'aile accroît l'efficacité de certains muscles du vol et facilite la manipulation des membranes alaires par les membres antérieurs (moteurs) et postérieurs (directeurs).

Les chauves souris ont un meilleur rendement mécanique que les oiseaux : 0,28 contre 0,19. Elles ont résolu différemment les problèmes mécaniques du vol :

- les battements de l'aile ne sont pas uniquement sous la dépendance des muscles pectoraux, mais résultent de l'action d'un très grand nombre de muscles puissants de l'épaule. Tous ces muscles proximaux entre en jeu successivement au cours des phases du mouvement.

- le fait que les articulations distales du membre antérieur ne fonctionnent que dans un seul plan, augmente l'efficacité des muscles de l'épaule dans le mouvement de l'aile tout entière.

- les déplacements des segments les plus distaux sont dus aux muscles du bras et de l'avant-bras. En effet, les muscles du carpe et du métacarpe, très tendinisés, envahis par des lames aponévrotiques, constituent des cordes assez rigides. Ce sont donc les muscles des segments proximaux qui détiennent la possibilité de mouvoir la partie distale de l'aile.

Les ailes de Chiroptères n'effectuent pas un simple battement vertical mais accomplissent un mouvement complexe de rotation de telle sorte que l'extrémité de l'aile décrit une ellipse. Le cycle de mouvement comprend deux phases : l'abaissement des ailes se fait de l'arrière vers l'avant, le relèvement se fait à l'inverse de bas en haut d'avant en arrière.

Les mammifères sont de moins bons voiliers et ne sont pas capables de vols à longue distance.

## Chapitre 2 : Circulation et respiration

Le dioxygène (O<sub>2</sub>) n'a pas toujours existé à la surface de la planète Terre. En effet, celui-ci a d'abord été produit par des cyanobactéries, il y a 2.5 milliards d'années. Ce dioxygène était et est toujours produit par les processus de photosynthèse dont il est un déchet. Il a d'abord saturé les océans avant de gagner l'atmosphère. Aujourd'hui, le dioxygène représente environ 20.9 % de l'atmosphère (dans les systèmes physiologiques, il est toujours sous forme gazeuse ou dissoute). Il est donc devenu un composé prépondérant de notre planète. Il a d'ailleurs façonné les espèces que l'on peut trouver actuellement en créant un milieu oxydant.

La circulation et la respiration sont deux fonctions essentielles chez les animaux qui vont permettre d'amener le dioxygène jusqu'à toutes les cellules. Seuls les Insectes n'utilisent pas la circulation pour le transport du dioxygène.

### 1- Phénomènes physiques sous-tendant les échanges gazeux

Tous les animaux ont des consommations importantes de dioxygène. Ce dioxygène doit donc être capté dans le milieu de vie de l'animal.

#### 1-1- Influence des caractéristiques du milieu de vie

Le document fournit les caractéristiques des deux milieux de vie classiques des animaux. Il permet de dégager les points suivants :

L'air est un milieu riche en dioxygène par rapport à l'eau (209 ml/l dans l'air contre 10 ml/l dans l'eau).

Dans l'eau, le gaz doit se dissoudre : la dissolution dépend des caractéristiques de la molécule d'eau (coefficient de solubilité pour le dioxygène faible), de la température (solubilité diminue avec la température), de la quantité d'ions contenue dans l'eau (différence eau douce – eau de mer).

→ Il est beaucoup plus facile de récupérer du dioxygène dans l'air que dans l'eau. A pression égale, il y a vingt fois plus de dioxygène dans l'air que dans l'eau ; donc pour extraire la même quantité de dioxygène, un animal aquatique doit disposer d'un volume vingt fois plus grand qu'un animal aérien.

La densité et la viscosité de l'eau sont plus élevées que celles de l'air (respectivement 800 fois et 50 fois). Cela implique que les mouvements de l'eau sont plus difficiles à effectuer que ceux de l'air.

→ Il y a non seulement moins de dioxygène dans l'eau que dans l'air ce qui implique de brasser une plus grande quantité de fluide pour récupérer la même quantité de dioxygène. Mais en plus, pour brasser le milieu cela demandera beaucoup plus d'énergie dans l'eau que dans l'air (800x50 fois plus d'énergie).

Le milieu aérien est favorable à l'extraction du dioxygène qui est abondant et facile à mobiliser au contraire de ce qui se passe en milieu aquatique. Par contre, il ne faut pas oublier que le milieu aérien est extrêmement déshydratant ce qui posera d'autres problèmes pour les surfaces d'échange. Néanmoins, la consommation de dioxygène est plus faible pour les animaux aquatiques (de 22 à 100 ml d'O<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>) que pour les animaux aériens (de 200 à 100 ml d'O<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>). Les animaux aquatiques ayant besoin de beaucoup plus d'énergie pour extraire le dioxygène, ils doivent se contenter de moins grandes exigences afin de pouvoir maintenir un bilan énergétique positif.

### 1-2-Phénomènes de diffusion

Le **document 1** fournit les caractéristiques des deux milieux de vie classiques des animaux. Il permet de dégager les points suivants :

- L'air est un milieu riche en dioxygène par rapport à l'eau (209 ml/l dans l'air contre 10 ml/l dans l'eau).
- Dans l'eau, le gaz doit se dissoudre : la dissolution dépend des caractéristiques de la molécule d'eau (coefficient de solubilité pour le dioxygène faible), de la température (solubilité diminue avec la température), de la quantité d'ions contenue dans l'eau (différence eau douce – eau de mer).

→ Il est beaucoup plus facile de récupérer du dioxygène dans l'air que dans l'eau. A pression égale, il y a vingt fois plus de dioxygène dans l'air que dans l'eau ; donc pour extraire la même quantité de dioxygène, un animal aquatique doit disposer d'un volume vingt fois plus grand qu'un animal aérien.

Une deuxième phase de l'étude du **document 1** peut maintenant être abordée :

- La densité et la viscosité de l'eau sont plus élevées que celles de l'air (respectivement 800 fois et 50 fois). Cela implique que les mouvements de l'eau sont plus difficiles à effectuer que ceux de l'air.

→ Il y a non seulement moins de dioxygène dans l'eau que dans l'air ce qui implique de brasser une plus grande quantité de fluide pour récupérer la même quantité de dioxygène. Mais en plus, pour brasser le milieu cela demandera beaucoup plus d'énergie dans l'eau que dans l'air (800x50 fois plus d'énergie).

*Conclusion partielle* : Le milieu aérien est favorable à l'extraction du dioxygène qui est abondant et facile à mobiliser au contraire de ce qui se passe en milieu aquatique. Par contre, il ne faut pas oublier que le milieu aérien est extrêmement déshydratant ce qui posera d'autres problèmes pour les surfaces d'échange. Néanmoins, le **document 4** montre que la consommation de dioxygène est plus faible pour les animaux aquatiques (de 22 à 100 ml d'O<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>) que pour les animaux aériens (de 200 à 100 ml d'O<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>). Les animaux aquatiques ayant besoin de beaucoup plus d'énergie pour extraire le dioxygène, ils doivent se contenter de moins grandes exigences afin de pouvoir maintenir un bilan énergétique positif.

### I – 2 – Phénomènes de diffusion

Les échanges entre le milieu de vie et l'intérieur de l'animal sont basés sur des processus de diffusion à l'interface entre les deux milieux. Il y a une condition préalable à tous les échanges de dioxygène, car celui-ci ne peut diffuser entre l'intérieur et l'extérieur d'un animal qu'en étant dissous dans un liquide.

Problème : La loi physique de Graham dit que la vitesse de diffusion d'un gaz dans un milieu est inversement proportionnelle à la racine carrée de leur masse molaire.

Donc, il va y avoir une limite de taille au-delà de laquelle la vitesse de diffusion sera trop faible pour que l'approvisionnement des cellules soit suffisant. Ainsi Harvey a démontré que si on considère un organisme fictif qui aurait la forme d'une sphère (cas le plus favorable), l'approvisionnement en dioxygène serait insuffisant dès que le diamètre excéderait 2 mm.

→ Cette démonstration permet de séparer les animaux en deux grandes catégories :

- les animaux dont la taille ou la consommation en dioxygène sont suffisamment faibles pour que les processus de diffusion soient suffisants ;
- les animaux dont la taille ou la consommation en dioxygène sont trop élevés pour se satisfaire de la seule diffusion, la diffusion sera alors couplée à une mise en place d'une

surface d'échange spécialisée (système respiratoire) et/ou à des phénomènes de convection (circulation interne) pour mobiliser le dioxygène.

Néanmoins, quelle que soit la taille de l'animal, le départ de l'échange est toujours basé sur les processus de diffusion. Ces processus sont soumis aux lois physiques sur la diffusion, en particulier la loi de Fick : le débit de diffusion à travers l'échangeur est d'autant plus rapide que la surface d'échange  $S$ , la différence de pression partielle  $\Delta P$  et le coefficient de diffusion seront élevés et que l'épaisseur  $e$  de l'échangeur sera faible.

On peut démontrer que :

- la surface d'échange est considérable : forte valeur de surface par unité de poids et surtout forte valeur de surface par rapport au volume pulmonaire (multiplication de la surface par rapport au volume de l'échangeur), valeurs qui sont intrinsèque à l'espèce (minimum chez la Grenouille, maximum chez le Pigeon).

- l'épaisseur de l'échangeur est très faible, maximum  $2\mu\text{m}$ , et qu'elle aussi dépend de l'espèce (corrélation de l'efficacité avec celle observée précédemment : maximum chez la Grenouille, minimum chez le Pigeon).

→ Sur ces exemples, on peut illustrer une organisation des surfaces d'échange beaucoup plus générale : chez la majorité des animaux, on observe un accroissement de la surface d'échange (par réalisation de replis) et une réduction extrême de l'épaisseur de l'échangeur. Cela contribue de manière générale à une fragilisation de la surface d'échange qui devra donc être protégée des agressions en particulier mécaniques.

## **2- Les organes d'échanges gazeux avec l'environnement**

Il existe plusieurs types d'échangeurs de dioxygène en fonction du degré d'organisation de l'animal et de son milieu de vie. Nous étudierons successivement les principales stratégies sélectionnées au cours de l'évolution en fonction du milieu.

### **2-1- Un système ubiquiste, la respiration cutanée**

Le transport des gaz par simple diffusion est une modalité très répandue. C'est la seule existante chez tous les animaux qui ont une faible taille ou de faibles exigences : Spongiaires, Cnidaires (faibles exigences car densité cellulaire très faible), Plathelminthes (aplatissement du corps pour limiter la distance de diffusion), Annélides...

Les Spongiaires de plus renouvellent leur milieu intérieur grâce à des cellules possédant un flagelle : les choanocytes. Ils créent ainsi un véritable courant unidirectionnel qui maintient un milieu riche en dioxygène au contact des cellules.

→ Un renouvellement du fluide extérieur (le plus souvent l'eau) est souvent observé chez les animaux qui pratiquent la diffusion simple afin de maintenir une différence de pression partielle en dioxygène entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme.

Néanmoins, ce type d'échange par diffusion ne se cantonne pas aux animaux les plus simples. La respiration cutanée est très importante chez bon nombre d'animaux de grande taille. Ce phénomène est bien documenté chez les vertébrés, en particulier les Amphibiens. De manière générale, dans ce taxon 30% des échanges de dioxygène se font par diffusion à travers la peau. Et l'hiver, saison à laquelle les besoins sont faibles car les amphibiens entrent en vie ralentie, la totalité des échanges peuvent s'effectuer par la peau.

La respiration cutanée associée à la diffusion est un processus d'échange répandu dans le règne animal. Sa prédominance dépend de la demande de l'animal. Si sa demande en dioxygène augmente, il doit alors compléter son approvisionnement grâce à un autre système.



Néanmoins, la respiration cutanée a un inconvénient, elle nécessite de maintenir les surfaces d'échanges (toute la peau) humide en permanence afin de dissoudre les gaz. Cela ne pose pas de problème en milieu aquatique. Par contre, en milieu aérien, cela produit une forte perte en eau par évaporation et donc un risque de déshydratation. Cela implique que les animaux pratiquant principalement cette modalité respiratoire devront se cantonner dans des milieux à hygrométrie élevée. Ce type d'échange est d'autre part souvent associé à une augmentation de la surface cutanée (parapodes des Néréis, replis cutanés de Grenouilles).

## **2-2- Respiration branchiale en milieu aqueux**

La respiration en milieu aquatique fait intervenir les branchies : évaginations localisées de la surface du corps, spécialisée dans les échanges respiratoires. Elles sont présentes chez de nombreux invertébrés aquatiques (Mollusques, Crustacés, Annélides...), chez les Poissons et chez divers Amphibiens.

L'exemple choisi afin de montrer le fonctionnement général est celui de la branchie des poissons téléostéens (Maquereau).

Les branchies chez les poissons téléostéens se situent dans les fentes pharyngiennes. Elles mettent ainsi en relation deux compartiments : la bouche avec la cavité branchiale de chaque côté. Chaque cavité branchiale est recouverte d'un repli protecteur, l'opercule qui s'ouvre sur l'extérieur au niveau de l'ouïe.

Chaque branchie est portée par un arc branchial squelettique. Elle forme des plis (lames branchiales) et des replis (lamelles branchiales). Les lames sont orientées perpendiculairement à l'arc branchial, les lames et les lamelles sont aussi orientées perpendiculairement entre elles. Ceci permet de développer une très grande surface d'échange (11.6 cm<sup>2</sup>/g de poids corporel).

Les lames branchiales n'ont pas de rôle direct dans l'échange du dioxygène. Elles servent uniquement de support aux lamelles et de zone de conduction pour les vaisseaux sanguins.

L'eau en passant de la bouche vers les cavités branchiales, circule le long des lamelles en rencontrant d'abord le vaisseau efférent (relativement riche en dioxygène) puis le vaisseau afférent (relativement pauvre en dioxygène). Les vaisseaux des lamelles branchiales ne sont pas étanches, donc le sang baigne la lamelle en totalité, ce qui permet des échanges sur une plus grande surface. Ce système, nommé système à contre courant permet de maintenir en permanence tout au long de la lamelle, une différence de pression partielle en dioxygène. Or, nous avons vu dans la partie précédente que c'était cette différence qui permettait de réaliser des échanges quantitativement convenables. Ce système branchial permet aux poissons téléostéens d'extraire 80% du dioxygène contenu dans l'eau qui circule dans les branchies.

Pour que le système fonctionne, il faut néanmoins que l'eau qui baigne les branchies soit en permanence renouvelée. Ceci est possible grâce à un système de pompes formées par la bouche et les cavités branchiales. Lorsque le poisson ouvre la bouche, il se crée une dépression qui va être compensée par une entrée d'eau dans ce compartiment. L'eau s'écoule dans le sens des pressions vers la cavité branchiale qui alors a une pression plus faible. Au passage entre les deux cavités, elle passe sur les branchies. Dans une deuxième phase, lorsque la bouche se referme, la pression augmente dans la cavité buccale, expulsant l'eau vers la cavité branchiale. Quand la pression est trop forte, l'opercule se soulève ce qui permet la sortie de l'eau pauvre en dioxygène.

La mobilisation de l'eau est donc sous contrôle des muscles du plancher buccal et des opercules. Or, l'activité de ces muscles peut être adaptée en fonction des demandes en dioxygène via un contrôle d'origine bulbaire (zone du cerveau). Le point de départ de la

boucle de régulation est un chimiorécepteur dans les branchies sensible à la teneur en dioxygène. De cette façon, le poisson peut répondre à des variations de besoin. Il peut multiplier ainsi l'approvisionnement en dioxygène par 5 en cas de demande (exercice musculaire par exemple).

Le cas du poisson téléostéen nous permet de dégager les grandes caractéristiques des systèmes branchiaux :

- modalité respiratoire adaptée à la vie aquatique car cela suppose forcément un courant d'eau ;
- mise en place d'un courant d'eau afin de renouveler le fluide à proximité de l'échangeur ;
- très forte surface développée avec le plus souvent un système à contre courant pour extraire au maximum le dioxygène de l'eau, cela limite ainsi le coût énergétique de la mise en mouvement du fluide ;
- prise en charge du dioxygène dans le milieu interne par le sang ou l'hémolymphe.

Ces différentes caractéristiques font des branchies le système le plus adapté des animaux à forte demande en dioxygène vivant en milieu aquatique. Néanmoins c'est un système qui ne peut pas fonctionner en milieu aérien car les structures ne sont pas assez protégées contre la déshydratation.

### **2-3- Respiration pulmonaire en milieu aérien**

Les poumons sont des surfaces d'échange respiratoire adaptées au milieu aérien : la protection des surfaces d'échange se traduit par une invagination du tégument. Cette invagination, plus ou moins complexe, constitue la cavité pulmonaire. L'atmosphère interne des poumons est saturée en vapeur d'eau permettant ainsi la dissolution du dioxygène dans une couche mince de liquide au contact de l'échangeur. Les pertes en eau sont néanmoins réduites car ces cavités sont protégées à l'intérieur de l'organisme.

L'exemple des poumons de Mammifères permet de dégager les grandes caractéristiques des systèmes pulmonaires :

- modalité respiratoire adaptée à la vie aérienne car elle permet une limitation des pertes en eau (surface internalisée) et n'est possible que parce que l'air est facilement mobilisable ;
- très grande surface d'échange : cette surface d'échange tend à augmenter chez les vertébrés tétrapodes au fur et à mesure de l'évolution (depuis les Amphibiens et les Reptiles avec des poumons peu développés aux Mammifères et Oiseaux qui sont les deux systèmes les plus perfectionnés) ;
- mise en place d'une ventilation afin de permettre le renouvellement de l'air dans les poumons ;
- prise en charge du dioxygène par le sang.

Les poumons les plus efficaces ne sont pas ceux des Mammifères mais ceux des Oiseaux. Ceci est à relier avec la demande en dioxygène accrue lors du vol. Les poumons des Oiseaux ne sont pas alvéolaires mais tubulaires. L'air suit alors un courant unidirectionnel qui permet un contre courant au niveau de l'échangeur. La surface d'échange est plus développée et plus efficace dans l'extraction du dioxygène, ce qui permet un meilleur approvisionnement.

Les poumons ne sont pas l'apanage des Vertébrés même si c'est dans ce taxon qu'ils sont les plus représentés. De nombreux invertébrés vivants en milieu aérien ont adopté cette

modalité : Gastéropodes, Arachnides. Ce n'est pas le cas des Insectes qui ont un système propre à ce groupe.

#### **2-4- Respiration trachéenne des insectes**

Dans le cas des branchies et des poumons, le fonctionnement du système respiratoire est couplé à un système circulatoire que nous allons étudier dans la troisième partie. Ce qui fait l'originalité du système respiratoire des Insectes, c'est que le dioxygène est apporté directement jusqu'aux cellules sous forme gazeuse. Le système circulatoire est donc totalement disjoint du système respiratoire, c'est le seul cas de ce type chez les Animaux.

Voyons l'organisation du système respiratoire des Insectes et son fonctionnement. L'air entre à l'intérieur du corps de l'insecte par un système de tubes nommés trachées : ce sont des formations qui restent ouvertes sur l'extérieur par le spiracle ou le stigmate (dépend de la taille de l'ouverture). L'intérieur des cellules présente de la cuticule dans la mesure où l'origine des trachées est épidermique : cela permet de maintenir les trachées ouvertes. L'intérieur des trachées est donc rempli d'air sauf à l'extrémité où se font les échanges (la trachéole est alors remplie du liquide trachéolaire). L'air diffusant facilement, la vitesse dans les trachées est suffisante pour approvisionner les cellules en dioxygène. Ce dioxygène est dissous dans le liquide trachéolaire avant de passer directement dans les cellules. Dans les cellules musculaires, les trachéoles pénètrent même dans les cellules, amenant le dioxygène à moins de 0.5  $\mu\text{m}$  des mitochondries.

Ce système de diffusion passive lié à la consommation cellulaire est amélioré chez les Insectes de grande taille par un système de ventilation. L'ouverture et la fermeture des spiracles permettent une ventilation sommaire au sein des trachées. L'ouverture des spiracles provoquant l'augmentation de la pression partielle en dioxygène dans les trachées. Les trachées sont alors reliées à des sacs aériens qui servent de réserve d'air. Lors de la contraction des muscles abdominaux, les sacs et les trachées se vident sous l'effet de la surpression : expiration active. Lors du relâchement des mêmes muscles, le volume des sacs augmente, permettant l'entrée d'air dans les trachées. Ces mouvements abdominaux sont associés aux ouvertures et fermetures des spiracles pour un meilleur fonctionnement.

Ce système peut lui aussi être régulé grâce à l'intensité de la ventilation, elle-même contrôlée par les ganglions abdominaux de la chaîne nerveuse. Mais la véritable régulation semble s'effectuer au niveau trachéolaire. Plus il y a du liquide dans les trachéoles, plus les échanges sont lents dans la mesure où la diffusion dans l'eau est plus lente que dans l'air. Il semblerait que le volume liquidien dans les trachéoles dépende directement de l'activité tissulaire. Lors d'une activité cellulaire importante, la pression osmotique des cellules augmenterait provoquant un appel d'eau des trachéoles : ces dernières contiendraient donc moins de liquide, augmentant la vitesse des échanges.

Le système trachéen est une modalité totalement originale dans le règne animal. Il permet aux insectes de s'affranchir du système circulatoire pour l'approvisionnement interne en dioxygène. C'est un système efficace car il permet de satisfaire aux fortes exigences des insectes (100000 ml d'O<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>). Néanmoins certaines théories sur l'évolution tendraient à montrer que ce système limite la taille des insectes.

Les systèmes respiratoires dépendent donc largement du milieu dans lequel vit l'animal. Le plus simple d'entre eux est la diffusion simple à travers les téguments. Ce système présente l'inconvénient d'être peu modulable et limité dans la quantité de dioxygène qu'il apporte à l'organisme. Par contre, les autres systèmes mettant en œuvre des structures spécialisées (branchies, poumons et trachées) permettent des tailles d'animaux plus importantes et surtout une activité physiologique plus élevée. Ils ont de plus une activité

modulable en fonction de celle de l'organisme. Il est à noter que chez certaines espèces étant revenues à la vie aquatique, on trouve toujours des systèmes respiratoires de type aérien : poumons des cétacés, trachéobranchies des insectes aquatiques. Cela impose à ces espèces de venir s'approvisionner en dioxygène à la surface de l'eau.

### 3- Les pigments respiratoires

Le dioxygène est pris en charge au niveau de la surface d'échange par le sang ou l'hémolymphe. Chez l'Homme, le volume sanguin est de 5 litres environ, ce qui permet la dissolution de 15 ml d'O<sub>2</sub>, soit 0.3 ml d'O<sub>2</sub>/100ml de sang. Or, les besoins sont d'environ 20 ml d'O<sub>2</sub>/100ml de sang. Cette approche quantitative montre donc que le transport sous forme dissoute ne permet pas un approvisionnement suffisant des cellules en dioxygène (du fait de sa faible dissolution dans l'eau). Elle est complétée par une forme combinée à un transporteur afin d'ajuster l'approvisionnement aux besoins. Ces transporteurs nommés pigments respiratoires sont présents chez de nombreux organismes animaux.

On peut séparer les pigments respiratoires en trois grandes catégories :

- Les pigments hémiques : Ils sont constitués de chaînes polypeptidiques associées chacune à un ion ferreux Fe<sup>2+</sup>, lui-même inséré dans une petite molécule organique nommée protoporphyrine. L'ensemble fer-protoporphyrine constitue l'hème, ce qui caractérise ces pigments. Chaque atome de fer est capable de fixer une molécule de dioxygène. Ce type de pigment est présent chez un tiers des classes du règne animal. Le premier type est formé par les hémoglobines qui ont une couleur rouge (sombre sans dioxygène, clair avec dioxygène). Elles peuvent être extracellulaires en solution dans le liquide interne (Annélides) ou intracellulaire dans les globules rouges chez les Vertébrés. Le deuxième type de pigment hémique est la chlorocruonine qui a une couleur verte (avec dioxygène) ou jaune (sans dioxygène). Son hème a une structure différente de celui de l'hémoglobine. On trouve la chlorocruonine chez quelques annélides.
- Les pigments hémérythrine : Dans ce cas, l'ion ferreux est directement lié aux chaînes polypeptidiques. C'est une forme peu commune présente chez quelques Annélides. La couleur est violette avec dioxygène et incolore sans dioxygène.
- Les pigments hémocyanines : Dans ce cas, l'ion métallique est le cuivre. Il y a deux ions fixés sur chaque chaîne polypeptidique. Cela donne une couleur bleue en présence de dioxygène et incolore sinon. Cette molécule est présente en solution dans l'hémolymphe des Crustacés, des Arachnides et des Mollusques.

Après ce bref aperçu de la variabilité des pigments respiratoires chez les animaux, on peut en retirer les points communs suivants :

- ce sont tous des métalloprotéines : protéine dont la structure abrite un ion métallique ;
- l'ion métallique est responsable de la fixation du dioxygène, ils changent de couleur en fonction de leur niveau d'oxydoréduction, d'où le nom de pigment respiratoire.

### 4- La circulation du milieu intérieur

Chez la majorité des triblastiques (hormis les Insectes), le dioxygène est pris en charge par les liquides internes (sang, hémolymphe, coelome) au niveau des surfaces d'échanges. Ces liquides seront ensuite mobilisés dans l'organisme afin d'aller approvisionner les différentes cellules.

#### 4-1- Les systèmes primitifs

Mouvements d'eau à l'intérieur de l'organisme : Chez les Spongiaires et les Cnidaires, c'est le milieu environnant qui permet les transports de nutriments et de catabolites grâce à un renouvellement permanent assuré par des cellules ciliées, flagellées ou musculaires.

Mouvements de liquides internes assurés par la musculature : Ce sont les mouvements de l'animal qui assurent une certaine circulation des liquides interstitiels. C'est le cas chez les annélides.

#### **4-2- Système circulatoire ouvert**

Dans les systèmes circulatoires ouverts, le «sang» baigne directement les organes (cas du Homard). Il n'y a donc pas de différence entre le sang et le liquide interstitiel : on parle alors d'hémolymphe. Les échanges chimiques entre le liquide et l'organisme se produisent lorsque l'hémolymphe suinte par des sinus (cavités entourant les organes). L'hémolymphe est propulsée par les mouvements corporels et par la contraction de plusieurs cœurs situés sur le vaisseau dorsal. Lorsque les cœurs se relâchent, ils aspirent l'hémolymphe par des pores nommés ostioles et équipés de valves. On trouve ce système chez les Arthropodes et les Mollusques (hormis les Céphalopodes).

#### **4-3- Système circulatoire clos**

Dans les systèmes circulatoires clos, le sang circule dans des vaisseaux (Maquereau). Dans ce cas, il y a deux compartiments différents : le sang et le liquide interstitiel. Les échanges chimiques entre le sang et les tissus se font au niveau des capillaires (vaisseaux sanguins de faible diamètre et de faible épaisseur où les éléments peuvent diffuser). Le sang est propulsé par un cœur dans les artères. Les artères débouchent dans les capillaires et le retour se fait par les veines. Le système étant fermé, le cœur permet de propulser le sang dans tout le circuit (car les liquides sont peu compressibles). On trouve ce système chez les Annélides, les Céphalopodes et les Vertébrés.

Chez les vertébrés ce système a évolué d'une boucle simple en milieu aquatique (poissons) à une double boucle en milieu aérien (reptiles, oiseaux, mammifères). Les amphibiens sont entre les deux systèmes avec un cœur à deux oreillettes mais un seul ventricule.

Les systèmes circulatoires ouverts et clos sont donc très différents ce qui va leur donner des caractéristiques de fonctionnement différentes.

Les pressions artérielles systoliques (lors de la contraction cardiaque) sont beaucoup plus basses chez les animaux à système ouvert (Moule, Homard : 1.9 à 3 mm de Hg) que chez les animaux à système clos (Poulpe, Vers de Terre, Truite, Grenouille, Homme : 30 à 120 mm de Hg). Ceci est dû au fait que dans les systèmes ouverts, il y a une perte de pression au niveau des sinus. Alors que dans les systèmes clos, la pression est maintenue dans tout le système. De plus, dans les systèmes clos, la présence des capillaires permettra de moduler la circulation locale (en modifiant leur diamètre et le recrutement) alors que les sinus ne sont pas modulables.

On peut comparer les deux systèmes entre le Homard (système ouvert) et le Maquereau (système clos) qui sont deux animaux de masse équivalente. Le volume circulant est plus important chez le Homard (85 ml) que chez le Maquereau (15 ml), ce qui conduit à un temps de circulation relativement long chez le Homard (128 s contre 75 s). Le débit cardiaque est néanmoins relativement élevé chez le Homard (40 ml/l contre 12 ml/l) mais le coût énergétique est faible (0.035 cal/100ml contre 0.12 cal/100ml) car les pressions maintenues dans les sinus sont faibles.

→ On peut conclure par l'efficacité du système ouvert par rapport au clos. L'extraction de dioxygène est 10 fois moins forte chez le Homard que chez le Maquereau, car il y a des pertes au niveau circulatoire. Le système clos paraît donc plus efficace que le système ouvert.

### Chapitre 3 : Nutrition et alimentation

La nutrition assure le maintien de la composition et de la structure de l'organisme. Elle doit couvrir deux types de besoins : renouvellement des molécules constitutives de l'organisme et couverture des dépenses énergétiques.

L'alimentation se caractérise par la séquence suivante :

- recherche et prise alimentaire
- fragmentation puis décomposition des substances alimentaires en molécules simples
- utilisation des précurseurs intégrés dans l'organisme
- rejet de l'organisme des sous produits du métabolisme intermédiaire (excrétion).

#### 1- Structure des appareils digestifs

##### 1-1- Les systèmes digestifs peu évolués

C'est le cas de cnidaires et des spongiaires.

Prenons le cas des cnidaires. Ce sont des prédateurs qui capturent leurs proies grâce à des dispositifs variés armés de nématocystes (ou cnidoblastes). En outre, ils disposent de produits de photosynthèse en raison de leur symbiose avec des algues unicellulaires, les zooxanthelles.

Dans l'endoderme, on retrouve deux types cellulaires :

- des cellules glandulaires qui libèrent des enzymes dans la cavité ;
- des cellules absorbantes souvent flagellées qui réalisent la phagocytose.

La digestion se fait donc en deux temps d'abord extracellulaire puis intracellulaire. Il faut deux heures de digestion extracellulaire pour fragmenter une proie et commencer la phagocytose. La partie digestion intracellulaire se fait dans des vésicules d'endocytose. Quand la digestion est terminée, le résidu de ces vésicules est expulsé par exocytose.

##### 1-2- Diversité des tubes digestifs antérieurs

Ils assurent d'une part la prise alimentaire et d'autre part une transformation préalable du bol alimentaire afin d'optimiser ensuite l'action des enzymes.

###### 1-2-1- Cas des annélides

Chez les annélides, il y a une grande diversité de régimes alimentaires. Globalement, la partie antérieure du tube digestif est formée par une trompe dévaginable. Elle est actionnée par des muscles. On peut parfois trouver dans la partie antérieure du tube, un jabot qui stocke la nourriture et un gésier qui malaxe (cas des *Lombrics*). Des palpes entourent la trompe et permettent d'amener la nourriture à la bouche. Pour le reste de la digestion, elle est essentiellement intracellulaire.

###### 1-2-2- Cas des insectes

La cavité buccale des insectes se nomme stomodéum. Les arthropodes capturent toujours leurs aliments à l'aide d'appendices. La cavité buccale ne sert qu'à la trituration ou à la préparation des aliments. Ce n'est donc qu'un lieu de transit du bol alimentaire. Chez les insectes cette bouche est séparée en deux chambre : le cibarium qui reçoit la nourriture et le salivarium qui reçoit les sécrétions salivaires. La séparation entre les deux est réalisée par l'hypopharynx.

Chez un certain nombre d'espèces, la salive produite contient des anticoagulants (Diptères) ou parfois de la soie (Lépidoptères). Sinon on ne connaît pas vraiment leur rôle enzymatique.

Dans la pharynx qui suit la bouche, des plaques chitineuse associées à des muscles assurent un malaxage du bol alimentaire. On passe ensuite à l'œsophage qui en fonction du régime alimentaire peut comprendre un jabot et un gésier.

### 1-2-3- Cas des vertébrés

La cavité buccopharyngée a subit une évolution unique dans la monde animal car elle a une fonction mixte de nutrition et de respiration.

Ce sont les arcs branchiaux primitifs qui se sont progressivement transformés. Ils donnent d'abord la mâchoire, puis lors de la conquête du milieu aérien les arcs branchiaux régressent pour donner le palais, des mâchoires plus solides, plus en dernier lieu les os de l'oreille interne. Les muscles branchiaux sont transformés pour mobiliser la mâchoire et la langue.

Le système de mâchoire serait inefficace sans la formation des dents. Chez les vertébrés aquatiques, les dents sont identiques, nombreuses. Elles sont remplacées de façon continue et elles ont une durée de vie courte.

Chez les tétrapodes, la localisation des dents se restreint et elles sont moins nombreuses. Les dents se spécialisent en fonction du régime alimentaire, ce qui est très marqué chez les mammifères.

Le reste du tube digestif antérieur est formé par le pharynx, l'œsophage et l'estomac.

Le pharynx peut présenter des spécialisations chez les vertébrés aquatiques comme par exemple un appareil de filtration. Chez les vertébrés terrestres, il régresse mais devient le carrefour des voies respiratoires et alimentaires.

L'œsophage est un tube qui peut parfois présenter des spécialisations dans sa partie terminale en formant un organe de réserve (jabot des oiseaux).

L'estomac est un organe de stockage qui est absent chez un grand nombre de vertébré aquatique. Quand il existe il a des fonctions proches de celle des mammifères. Chez les oiseaux, l'estomac est divisé en deux poches : ventricule succenturié (glandulaire) et gésier (broyeur).

### 1-3- Spécialisation du tube digestif postérieur

Le tube postérieur est spécialisé dans la digestion et l'absorption. Les plathelminthes ont un tube digestif à une seule ouverture mais à partir des némathelminthes une deuxième ouverture est percée.

De même, on va progressivement passer d'une digestion intracellulaire à une digestion extracellulaire. Cela va s'accompagner de la sécrétion d'enzymes dans la cavité de l'intestin et de l'absorption de molécules de plus en plus petites par diffusion au détriment de l'endocytose.

Chez les Mollusques et les Arthropodes, il y a formation d'un hépatopancréas. Celui-ci est formé de très nombreux diverticules qui permettent d'augmenter la surface d'échange.

Chez les vertébrés, de nombreuses glandes débouchent au niveau de la zone pylorique. Ces glandes participent largement au processus de digestion.

Enfin, l'intestin postérieur assure le modelage des fèces. De plus, chez certains groupes, il présente des spécialisations :

- panse rectale des termites remplie de flagellés
- caecum intestinal des oiseaux et des vertébrés qui abritent des bactéries.

## 2- Les grands types de comportements alimentaires



Il existe de grands types de régimes alimentaires basés sur la taille des particules absorbées et sur leur origine :

- microphagie : se nourrir d'aliments de petites tailles (particules), elle est souvent associée aux détritivores ;
- macrophage : se nourris d'aliments de grande taille d'origine végétale (phytophages) ou d'origine animale (carnivores).
- osmotrophes : parasites ou embryons de mammifères.

### **2-1- La microphagie**

Il existe plusieurs modalités afin de fouillier le milieu afin de récupérer les particules organiques qu'il contient.

#### **2-1-1- Microphagie avec courant d'eau**

La vocation du courant d'eau mis en place est toujours mixte. Il permet l'alimentation mais aussi le plus souvent la respiration et parfois la locomotion.

a- Chez les Spongiaires, le courant d'eau est réalisé par les flagelles des choanocytes. Ces mouvements permettent de créer un appel d'eau dans les éponges. Au passage, les cellules récupèrent les particules qui sont contenues dans l'eau afin de se nourrir.

b- La microphagie avec courant d'eau est un mode alimentaire très pratiqué chez les annélides polychètes. Prenons le cas de la Sabelle qui possède de nombreux tentacules. Chaque tentacule est turgescent grâce à un diverticule du coelome. Il y a un double rangé de ramifications de chaque côté du tentacule qui est creusé par un sillon sur sa face interne. L'ensemble des sillons convergent vers la bouche. Les cils créent plusieurs courants dont un récupère les particules : elles sont triées par un diverticule qui ne laisse passer qu'une certaine gamme de taille. Les particules les plus fines partent vers la bouche, les autres particules servent à la construction du tube qui abrite le vers.

c- Chez les Lamellibranches, la microphagie est le régime alimentaire le plus courant. Il est lié à une spécialisation des branchies. Chaque branchie est constituée d'une double rangée de filaments chacun repliés en U. L'extrémité distale des filaments réfléchis se soude soit à la masse viscérale, soit au manteau. Les branchies s'étendent jusqu'à la bouche. Le filtre branchial scinde la cavité palléale en deux. Les courant d'eau est lié aux mouvements des palpes labiaux et des cils qui couvrent les branchies.

En avant les particules sont prises en charge par les palpes labiaux qui rejettent les plus grosses particules et acheminent les plus petites vers la bouche. C'est un premier mode de filtre. Le deuxième mode est réalisé par les branchies. Celles-ci tamisent l'eau qui circule dans la coquille et enrobent les particules dans du mucus. Les particules ainsi enrobées sont dirigées par des cils vers la bouche. La quantité d'eau filtrée est de 1 à 8 L /h.

Le tube digestif des lamellibranches est simplifié par rapport aux autres mollusques en raison de la taille des particules ingérées.

d- Chez les crustacés cirripèdes, les mouvements d'eau sont liés à des mouvements d'appendices. Prenons le cas des balanes. Le thorax sort de la carapace et permet le déploiement des cirres postérieurs. L'eau pénètre dans la cavité par la fente operculaire et est filtrée par les cirres antérieurs. La rétraction du thorax chasse l'eau tandis que les cirres en s'enroulant apportent à la bouche les particules capturées. On a coexistence de deux mécanismes : un passif au niveau des cirres buccaux et un actif au niveau des cirres

postérieurs. Cette activité qui permet l'alimentation et la respiration est liée à la présence de muscles efficaces.

La microphagie avec courant d'eau est pratiquée par de nombreux crustacés planctoniques : copépodes et daphnies.

En domaine pélagique, 80% de l'ensemble des transferts est réalisé par microphagie. C'est un système indispensable au fonctionnement des écosystèmes pélagiques. L'inconvénient de ce mode nutritif est qu'il provoque des bios accumulations de substances toxiques en raison des grands volumes d'eau filtrée (test sur les daphnies).

### 2-1-2- Microphagie sans courant d'eau

Deux modalités font partie de ce mode alimentaire. Les animaux peuvent être suspensivores ou alors limnivores ou dépositivores. Dans le premier cas, les particules sont contenues dans l'eau alors que dans le deuxième cas, les particules sont mélangées avec des sédiments. Ces animaux font partie des détrivores.

a- Les dépositivores. C'est le cas d'une partie des polychètes. Chez les térébellidés, les tentacules sont portés par le prostomium modifié. Les tentacules ont une musculature propre qui les rend très déformables. Ils fouillent la couche de sédiments autour du ver. La capture se fait par adhésion aux tentacules par du mucus puis par rétraction des tentacules vers la bouche.

Les échinodermes et quelques mollusques sont aussi des dépositivores.

b- Les limnivores. La limite avec les dépositivores est floue. Les limnivores sont des animaux qui vivent dans les sols (endogés). Ils se nourrissent de sol qui contient des particules organiques. Les annélides fournissent là encore de nombreux exemples : Arénicole ou Lombric. Le sédiment est ingéré grâce à une trompe dévaginable. L'Arénicole mange le sable dans lequel elle a concentré les particules organiques plus légères grâce à la dépression creusée par le terrier. Néanmoins elles ingèrent de grandes quantité de sable : on estime que les quelques dm superficiels des plages sont renouvelés tous les 2 ans. On a la même chose avec les Lombrics en milieu terrestre.

### 2-1-3- L'osmotrophie

Dans ce cas les particules ingérées sont directement des nutriments. C'est le cas entre les Cnidaires coloniaux et les zooxanthelles qu'ils habitent. Il a été démontré que ces zooxanthelles fournissent directement sous forme de nutriments 40 à 60% des apports alimentaires chez les cnidaires.

De même, chez les vesmentifères (sorte de vers que l'on trouve dans les dorsales océaniques), il n'y a pas de tube digestif à aucun stade de développement. Donc les apports alimentaires proviennent de substances captées directement dans le milieu par diffusion et surtout par les apports de bactéries symbiotiques.

## 2-2- La phytophagie

La phytophagie consiste à se nourrir de parties de végétaux. Elle comprend des régimes alimentaires très variés en fonction des parties végétales consommées : phyllophages (mangeurs de feuilles), xylophages (mangeurs de bois), granivores (mangeurs de graines), nectarivores (mangeurs de nectar)...

### 2-2-1- Adaptation de la prise alimentaire

La prise alimentaire dépend du type de végétaux consommés.

On se servira du cas des insectes qui présentent tous les types de régimes alimentaires phyllophages :

- cas des herbivores et des xylophages : C'est le type primitif du régime alimentaire des insectes. Il se caractérise par des mandibules puissantes dépourvues de palpes qui permettent de sectionner et de concasser les végétaux. Les maxilles permettent de maintenir les aliments sur les surfaces d'usures des mandibules.
- cas des nectarivores et des frugivores : Dans cet exemple, il existe plusieurs voies évolutives. Chez les hyménoptères, le labium et les maxilles sont modifiées mais pas les mandibules. L'hypopharynx permet de lécher les fleurs. Chez les lépidoptères, la trompe est hypertrophiée en raison de l'allongement d'une partie des maxilles. Cela permet d'aspirer le nectar des fleurs.
- Cas des suceurs de sèves : C'est le cas des homoptères et des héteroptères. L'appareil buccal doit pouvoir perforer les tissus et aspirer la sève. Certaines parties des pièces buccales sont allongées et sclérotiques afin de pouvoir percer le végétal. Un canal est ménagé au centre des stylets afin d'aspirer le liquide.

Chez les vertébrés, ce sont les dents qui sont modifiées en fonction du régime alimentaire. Chez les oiseaux, la taille et la forme du bec sont adaptées au type de régime alimentaire. Chez les mammifères, les dents reflètent avec précision le régime alimentaire. Les dents labiales (incisives et canines) sont des organes de préhension avec une racine. Les dents jugales (prémolaires et molaires) servent à la mastication et ont souvent plusieurs racines.

Chez les herbivores, les dents ont souvent une croissance continue durant toute la vie de l'animal. Cette croissance compense l'usure de la couronne due au régime alimentaire. Il existe d'autre part une séparation morphologique entre les dents labiales et les dents jugales par un espace nu sur la mâchoire (barre). Les canines sont souvent régressées.

### 2-2-2- Problèmes physiologiques de la phytophagie

Plusieurs problèmes peuvent se poser en raison des spécificités biochimiques des végétaux : régime alimentaire très riche en eau sauf pour les granivores, présence de cellulose non digestible par de nombreux animaux.

a- Problème de l'eau : Les tissus végétaux sont très riches en eau (90% en moyenne). Il existe deux situations extrêmes opposées : les graines qui sont des aliments déshydratés et la sève ou le nectar qui ne contiennent quasiment que de l'eau.

La sève contient de faibles proportions de protéines mais beaucoup de sucres. Ces excès de sucres sont rejetés sous forme de miellats chez les pucerons. D'autre part, au niveau du tube digestif, il existe une chambre filtrante située en arrière de l'œsophage. Cette chambre permet de court-circuiter les excès d'eau et de glucides et d'éviter ainsi qu'ils passent dans le milieu intérieur.

b- Digestion de la cellulose : La cellulose est digérable grâce à des microorganismes. Ces microorganismes sécrètent des cellulases qui permettent la digestion et ensuite l'utilisation des glucoses par l'hôte. Quelques mollusques, annélides et crustacés sont capables de fabriquer des cellulases mais cela reste exceptionnel.

Chez les lapins, des bactéries sont situées dans le caecum intestinal et assurent la digestion de la cellulose. Elles produisent d'autre des acides gras. Les composés intéressants sont absorbés par le gros intestin où les crottes sont réingérées afin de traverser à nouveau tout le tube digestif et les résidus glucidiques sont absorbés lors du deuxième passage.

Chez les grillons, il y a association avec des bactéries et des levures. Les symbiotes sont hébergés dans le tube digestif et permettent d'augmenter la digestibilité des aliments.

Chez les mammifères herbivores et les termites, il y a association avec des bactéries et des protozoaires. Chez le cheval et les termites, seuls les résidus dégradés sont utilisés. Chez les ruminants, les symbiotes sont eux-même digérés ce qui permet d'augmenter aussi les apports azotés.

Chez les ruminants, l'estomac est compartimenté en quatre chambres : panse, bonnet, feuillet et caillette. Seule la caillette est homologue à l'estomac, les trois autres chambres sont des dilatations de l'œsophage.

La cellulose est digérée dans la panse (cavité de 250 L chez le bœuf). Elle contient de nombreuses bactéries et de nombreux ciliés. Les acides gras volatils produits sont absorbés par la paroi du rumen. Le méthane et le CO<sub>2</sub> sont éliminés par éructation. Les bactéries dégradent les protéines et absorbent les acides aminés. Les restes sont récupérés par le rumen. Pendant la fermentation, l'animal régurgite et mastique les aliments, c'est la rumination. Périodiquement, une partie de la panse passe dans le reste de l'estomac. Le feuillet permettrait la réabsorption d'eau. La caillette réaliserait la digestion des aliments restants et des symbiotes. Les ciliés hébergés sont capables de digérer la cellulose mais dans les faits ils se nourrissent essentiellement des bactéries. Les ciliés auraient donc un rôle régulateur sur les populations de bactéries et amélioreraient les rendements de digestion.

Chez les bœufs, le rumen contient 2 kg de ciliés et de bactéries. L'accroissement des populations de symbiotes permet au bœuf d'en digérer 1kg500 tous les jours.

### **2-3- La prédation**

Dans ce cas, les espèces mangées sont animales. Les prédateurs sont généralement assez spécialisés dans leurs types de proies. C'est un mode de consommation très spécialisé qui nécessite des comportements complexes et des outils spécialisés.

#### 2-3-1- La prédation sans outil

C'est le cas des cnidaires dont nous avons déjà parlé.

Les étoiles de mer n'ont pas d'outils spécialisés pour la prédation. Elles s'attaquent à des proies souvent fixées au substrat. Pour se nourrir, elles dévagent une partie de leur estomac contre la proie dont les tissus sont alors digérés. L'absorption se fait alors directement à travers la paroi de l'estomac après digestion extracellulaire et/ou les particules plus grosses vont être récupéré par le reste de l'estomac.

#### 2-3-2- Outils liés à des modifications du tube digestif antérieur

Prenons le cas des insectes. Chez ceux-ci le modèle de base des prédateurs est le modèle broyeur. Chez les larves d'odonates, une modification des pièces buccales a lieu qui conduit à la formation du masque. Celui-ci est extensible et possède des pinces à son extrémité distale afin de saisir les proies.

Chez les mammifères, les dents sont modifiées suivant deux axes principaux

- chez les insectivores, les dents jugales ont des cuspidés aiguës qui transpercent le tégument des proies ;
- chez les carnivores, les dents jugales ont des tubercules aiguës et des arrêtes tranchantes, d'autre part une prémolaire et une molaire sont transformés en carnassières pour cisailer. Les canines sont allongées en crocs.

#### 2-3-3- Les outils indépendants du tube digestif

Il existe de nombreux dispositifs indépendants du tube digestif qui vont permettre de capturer les proies :

- Chez les arthropodes, on peut citer les pattes ravisseuses des Mantes religieuses, les pinces des décapodes, les chélicères des arachnides. On peut citer aussi la formation de pièges afin d'aider à la capture des proies : entonnoir de la larve de fourmilion, toiles des araignées. D'autre part, il peut y avoir aussi différenciation d'appareils venimeux comme chez les hyménoptères, les scorpions.
- Chez les céphalopodes, la spécialisation vers la prédation est très poussée. Les proies sont capturées à l'aide des tentacules situés autour de la bouche. Ces tentacules sont issus d'une transformation du pied et sont fortement innervés. Dans la majorité des cas, ces tentacules sont tapissés par des ventouses revêtues de chitine. Chez la Seiche, la projection des bras et le retour à la bouche prennent moins d'une demi seconde. La bouche des céphalopodes contient des parties cornées qui forment un bec puissant. La radula située dans la bouche en arrière du bec est armée de dents qui vont avoir un rôle secondaire dans la dilacération. Le tube digestif est très spécialisé par rapport au modèle mollusque.
- Chez les serpents, il y a un développement important des glandes venimeuses qui permettent de tuer la proie facilitant l'avalement et la digestion future. Il n'y a quasiment pas de mastication.

## Chapitre 4 : Excrétion et osmorégulation

La stabilité du milieu intérieur va dépendre de la régulation des pertes ou des gains d'eau (volémie) et de celle des ions (osmolarité). On nommera osmorégulateur, un animal qui ne possède pas la même pression osmotique interne que le milieu dans lequel il vit.

D'autre part, les animaux ont la nécessité de supprimer les déchets azotés produits par le métabolisme ce qui conduira aux processus d'excrétion.

Nous allons voir les différentes solutions prises par les animaux en fonction de leur milieu de vie.

### 1- Les types d'excrétion en fonction du milieu

L'élimination des déchets de la nutrition cellulaire et leur retour dans le milieu extérieur constitue l'excrétion. Pour les productions de  $\text{CO}_2$ , l'élimination se fait avec le système respiratoire. Pour les autres substances en excès, les appareils excréteurs vont permettre soit leur stockage, soit leur élimination. Dans la majorité des cas, les processus d'excrétion sont liés aux processus d'osmorégulation (maintien des concentrations des milieux internes) quand ils existent. Les déchets produits en plus grande quantité après le  $\text{CO}_2$  sont les déchets contenant des atomes d'azote, que nous allons détailler ci après.

#### 1-1- Les différents types de déchets azotés

Les sources de molécules qui contiennent de l'azote sont les protéines et les bases azotées. Les processus de détoxification de ces deux types moléculaires ne sont pas les mêmes.

##### 1-1-1- L'azote d'origine protéique

Le renouvellement et le vieillissement cellulaires nécessitent l'hydrolyse des édifices protéiques. Ceci conduit à des acides aminés qui sont remis en circulation. Les acides aminés surnuméraires sont utilisés dans le métabolisme énergétique ce qui produit des molécules d'ammoniac.

Plusieurs processus métaboliques permettent de libérer des molécules d'ammoniac ( $\text{NH}_4^+$ ) par transamination ou désamination oxydative. Dans tous les cas, une partie du squelette carboné est récupéré et de l'ammoniac est libéré. La plaque tournante de ce métabolisme est l'acide glutamique couplée au glutamate.

Dans tous les cas, de l'ammoniac est libéré or c'est une molécule hautement toxique car elle modifie des transferts ioniques et le pH intracellulaire. Cet ammoniac doit donc être éliminé rapidement. Soit pour cela il est éliminé en solution dans l'eau, soit il est transformé en un composé moins toxique urée ou acide urique.

##### 1-1-2- L'azote d'origine nucléique

La guanine est une base azotée qui peut être stockée en particulier dans les adipocytes (très développé chez les insectes). Par contre les autres bases azotées en excès doivent être éliminées après transformation.

Les bases pyrimidiques donnent après transformation de l'ammoniac et un acide aminé. Les bases puriques donnent de l'acide urique.

Chez les insectes, les oiseaux et les reptiles, le métabolisme s'arrête à la formation de l'acide urique. Pour les autres êtres vivants cela peut conduire à un catabolisme plus poussé

donnant de l'ammoniac ou alors des composés intermédiaires comme l'acide allantoïque ou l'urée.

D'autres composés contenant de l'azote sont fabriqués par l'organisme : la créatinine (produite par les muscles des vertébrés) est le plus connu d'entre eux.

### 1-1-3- Détoxification de l'ammoniac

Deux voies existent dans le règne animal, soit production d'urée, soit production d'acide urique. La production d'urée est réalisée par le foie des mammifères par exemple, elle se nomme uréogénèse. Elle fait intervenir la mitochondrie du foie de manière obligatoire. Voir cycle de l'urée en biochimie.

L'uricogénèse, formation d'acide urique, a été mise en évidence chez les oiseaux. Elle fait aussi intervenir la mitochondrie.

Pour fabriquer une molécule d'acide urique, il faut 5 ATP, par contre pour fabriquer une molécule d'ammoniac, il faut 3 ATP.

La régulation du métabolisme hydrominéral implique une déperdition d'eau plus ou moins importante, mise à profit pour éliminer les déchets azotés. Le type de déchet azoté dépend de la disponibilité en eau car ils ne demandent pas tous la même quantité d'eau pour être éliminé. Le catabolisme azoté produit trois composés majeurs associés chacun à un mode d'excrétion : ammoniac (ammoniotélie), urée (uréotélie), acide urique (uricotélie). Un animal excrète souvent plusieurs composés ce qui conduit à des types d'excrétion mixtes.

Pour traiter 1 g d'azote sous forme d'	Ammoniac, il faut	500 ml d'eau.
	Urée	50 ml d'eau.
	Acide urique	10 ml d'eau.

## 1-2- Les différents types d'osmorégulation

Ils dépendent du milieu de vie de l'animal.

### 1-2-1- L'osmorégulation en milieu marin

Milieu marin : 1100 mOsmol/l.

La plupart des invertébrés marins possèdent des liquides biologiques isotoniques par rapport au milieu marin. Toutefois, les concentrations d'électrolytes entre le milieu externe et interne varient en raison de l'équilibre de Donnan (concentration interne en protéine).

Les vertébrés marins ont un milieu interne de 300 mOsmol/l. La tendance en absence de régulation est donc la perte d'eau et l'entrée d'ions.

Chez les Sélaciens, la régulation est réalisée grâce à un fort taux d'urée dans le sang (20 g/l, toxique pour les autres vertébrés), par la formation d'une urine hypertonique et par la sécrétion d'ions par les glandes rectales.

Les poissons téléostéens n'augmentent pas leur concentration ionique interne car ils ont pour ancêtre des poissons d'eau douce. Ils perdent par conséquent en permanence de l'eau. Ils compensent cela en buvant en permanence et en excréant les ions grâce à leurs branchies (cellules à chlorures).

On retrouve le même type de glande excrétrice d'ions chez les oiseaux marins au niveau des glandes à sel (bec).

Les mammifères marins ont une urine hyper concentrée (1500 mOsmol/l).

### 1-2-2- L'osmorégulation en milieu dulcicole

Eau douce : 0.1 à 10 mOsmol/l.

Les animaux d'eau douce ont des problèmes inverses à ceux du milieu marin : entrée d'eau et pertes d'ions.

Chez les invertébrés dans la plupart des cas, on ne connaît pas les structures impliquées. Chez les larves de Chironomes (proche des moustiques), il y a une absorption active d'ions au niveau du rectum.

Chez les Poissons téléostéens, l'entrée d'eau se fait par les branchies et par la peau. La boisson est faible. La perte des solutés est limitée par la formation d'une urine très abondante et diluée et par la réabsorption d'ions par les cellules à chlorures des branchies.

Chez les Amphibiens, le flux d'eau est modulé par les hormones comme l'ADH. L'urine est diluée et il y a absorption d'ions au niveau de la peau.

### 1-2-3- L'osmorégulation en milieu aérien

La menace de ce type de milieu est la déshydratation. Cela limite considérablement les possibilités de colonisation par les animaux et seuls deux groupes ont vraiment réussi : les insectes et les vertébrés.

Une première adaptation réside en un tégument relativement imperméable : cuticule des arthropodes, coquille des mollusques, kératine de la peau.

Chez les Arthropodes, la couche de cire de la cuticule rend celle-ci imperméable. Les pertes d'eau sont réduites au niveau des urines et des fèces (réabsorption rectale, excrétion sous forme d'acide urique).

Les amphibiens résistent en milieu aérien car ils sont capables de supporter de fortes variations de volémie : réserve hydrique qui peut atteindre le 1/3 du poids de l'animal. Les reptiles ont le même genre de comportement.

Chez les oiseaux et les mammifères, les pertes d'eau sont amoindries au niveau du tégument et surtout au niveau de l'urine. Le tableau présente l'équilibre hydrique de deux animaux dont un adapté au milieu désertique. L'homme meurt s'il perd plus de 12% de son eau.

## 2- Les organes qui permettent l'excrétion

L'expulsion des déchets azotés détermine un flux de substances qui transitent soit par diffusion, soit par des organes excréteurs. La mise en place du coelome crée un milieu intérieur qu'il va falloir maintenir. Avec lui apparaît donc la nécessité des organes excréteurs. Ces organes vont se complexifier avec l'évolution.

### 2-1- Les métanéphridies des Annélides

Chez les annélides, chaque métamère possède son propre organe excréteur : les métanéphridies. Ces métanéphridies sont ouvertes dans la cavité générale au niveau du néphrostome. Le cordon néphridien le met en relation avec le milieu extérieur. La métanéphridie de la Sabelle permet de réaliser des réabsorptions d'acides aminés et de sucres et permet de mettre en place une urine hypertonique par rapport au milieu intérieur.

Chez certains annélides, les néphridies sont regroupées sur un nombre de métamères moins importants (parfois un seul). Chez d'autres annélides comme la néréis, l'élimination des gamètes se fait par les métanéphridies.

### 2-2- La glande verte de l'écrevisse

Chez les crustacés, les organes excréteurs grossissent pour se transformer en glandes vertes. Cette glande a un rôle dans l'excrétion et dans l'osmorégulation. Cette glande permet de réaliser une urine diluée en relation avec le milieu de vie d'eau douce de l'animal. Elle permet de filtrer l'hémolymphe de l'animal. La physiologie précise n'est pas élucidée.



### **2-3- Les tubes de Malpighi des insectes**

Les tubes de Malpighi sont des tubes aveugles à une extrémité et débouchant de l'autre au niveau du proctodeum. Ils permettent de filtrer l'hémolymphe dans laquelle baignent les extrémités aveugles des tubes. Ils sont disposés en couronne au niveau du tube digestif. Leur nombre est très variable en fonction des espèces : de deux à 200. Ils sont entourés d'une gaine musculaire qui permet de les mettre en mouvement. Leur structure est plus ou moins complexe en fonction des groupes.

La formation de l'urine dans les tubes de Malpighi ne fait intervenir aucune filtration ce qui est un cas particulier dans le règne animal. La formation de l'urine résulte d'un intense transport de potassium dans les tubes auquel s'ajoute des transports de calcium, magnésium et phosphates. Cela contribue à former un gradient osmotique. L'eau en passant à travers la membrane entraîne avec elle des molécules organiques solubles : AA, sucres, acide urique.

Ensuite, l'eau est réabsorbée de manière sélective ainsi que certains composés (ions, sucres, AA) au niveau du proctodeum. Seuls des déchets azotés sont réellement éliminés. L'intensité de la récupération hydrique dépend du régime alimentaire de l'insecte. Le passage des substances contre le gradient de concentration est possible en raison d'une certaine imperméabilisation de la zone par la cuticule.

Chez de nombreux insectes terrestres, des tissus servent d'accumulation aux déchets. On les nomme rein d'accumulation. C'est le cas entre autre du tissu adipeux (bases puriques).

### **2-4- Le rein des vertébrés**

Les reins sont formés par une grande répétition d'unités fonctionnelles : les néphrons (voir cours de physio A). Au cours de l'évolution des vertébrés, le rein devient de plus en plus massif avec accumulation de néphrons. L'évolution des reins lors du développement embryonnaire est complexe avec formation de plusieurs reins successifs et est fortement associé à la mise en place des l'appareil reproducteur.

### **2-5- Les branchies des poissons**

Deux types cellulaires principaux forment l'épithélium des lamelles branchiales : des cellules plates (3 à 5  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) impliquées surtout dans les échanges gazeux, forment l'épithélium des lamelles secondaires, et des cellules plus épaisses, toujours situées dans l'épithélium des lamelles primaires (cellules à chlorures ou ionocytes). Ces cellules à chlorure présentent une forte densité en mitochondries, des réserves de glycogène ce qui signe une activité cellulaire importante. Ces cellules sont spécialisées dans le transport d'ions (dont le sens varie en fonction du milieu).

Les oiseaux ont le même type d'adaptations au niveau des glandes à sel de leur bec.

## Chapitre 5 : La thermorégulation

Le métabolisme est très sensible à la température. Par exemple, la vitesse de la respiration cellulaire augmente en même temps que la température. Le comportement face à la température varie en fonction des animaux :

- certains animaux laissent leur température varier avec celle du milieu (leur courbe de température en fonction de celle du milieu forme une droite affine) : ce sont des ectothermes ou poïkilothermes ;
- d'autres maintiennent leur température constante, indépendamment de celle du milieu : ce sont les endothermes (uniquement les oiseaux et les mammifères).

Parmi les endothermes, deux catégories peuvent être différenciées :

- les homéothermes stricts qui régulent leur température en permanence pour la maintenir constante ;
- les hétérothermes (animaux qui hibernent : Marmotte) qui laissent descendre leur température pendant l'hiver afin de limiter la dépense énergétique.

### 1- Equilibre thermique avec le milieu ambiant chez un homéotherme

Selon la température du milieu qui l'environne, un organisme non isolé perd ou gagne des calories. Ces échanges thermiques peuvent se faire de manière différente :

- par évaporation : à travers le tégument, même en l'absence de glandes sudoripares ;
- par conduction : dans le cas où le tégument est en contact avec un objet solide ;
- par convection : si le contact se fait avec un fluide plus ou moins turbulent comme l'air ;
- par radiation : il s'agit de l'émission par un corps chaud de radiations infrarouges.

Pour l'organisme, l'ensemble des pertes constitue la thermolyse. L'homéothermie suppose une production calorifique compensatrice, la thermogenèse.

La réalisation de l'homéothermie est possible dans un intervalle de température limité. La zone de neutralité thermique correspond à une absence de lutte contre la chaleur et le froid, elle est plus basse que la température du corps car le métabolisme basal fournit une thermogenèse incontournable.

Dans la lutte contre le froid, la thermogenèse suit l'augmentation du métabolisme et compense la croissance de la thermolyse (liée au milieu). L'homéothermie est maintenue jusqu'au métabolisme de sommet. En deçà, la thermolyse l'emporte et le corps se refroidit, c'est l'hypothermie (valeur létale de la température interne : 26°C).

Dans la lutte contre la chaleur, la thermolyse augmente mais le métabolisme aussi. Au-delà d'une certaine limite, la déperdition n'est plus possible, ce qui conduit à une hyperthermie (valeur létale de la température interne : 42°C).

La température du corps d'un endotherme n'est pas homogène. Son organisme peut se réduire grossièrement à :

- un noyau, producteur constant de chaleur et qui doit avoir une température constante (cœur, cerveau, foie, graisse brune, muscles squelettiques actifs) ;
- une enveloppe qui elle assure l'isolation et qui a une température variable en fonction de celle du milieu (téguments et tissus sous cutanés).

## 2- Efficacité des réponses thermorégulatrices chez les homéothermes stricts

Les réponses seront différentes suivant que l'on est dans une ambiance froide ou dans une ambiance chaude.

### 2-1- Dans une ambiance froide

L'enveloppe réduit la thermolyse :

- Les réponses comportementales réduisent la surface de déperdition : enroulement des animaux sur eux-mêmes, position de la tortue des Manchots, port de vêtements chauds chez l'homme.
- Des réponses morphologiques au froid existent chez les animaux homéothermes. Chez les renards et les lapins, la longueur des pattes et des oreilles décroissent quand le milieu devient plus froid. C'est une illustration de la règle d'Allen : chez les mammifères et oiseaux des zones froides, il y a une tendance au raccourcissement des appendices. D'autre part, chez les Manchots, la taille et le poids augmentent quand on va vers les pôles. Une deuxième règle peut donc être observée, la règle de Bergman : corrélativement, la taille et la masse des animaux s'accroissent avec le froid. Ces deux types d'adaptations morphologiques ont pour effet de diminuer les pertes de chaleur par échange cutané et permettent donc des économies d'énergie lors de la thermorégulation en milieu froid.
- L'horripilation accroît l'épaisseur tégumentaire : l'érection des poils ou des plumes emprisonne un plus grand volume d'air, et donc l'isolation (chez l'homme, c'est la chair de poule qui n'a aucune efficacité en raison du faible nombre de poils).
- La vasoconstriction cutanée réduit la circulation superficielle : les shunts veineux favorisent le retour profond au détriment du retour sous-cutané.
- L'homéoconcentration réduit la conductibilité sanguine par augmentation de l'hématocrite.

Ces phénomènes réduisent la conductance de l'enveloppe ce qui réduit les pertes.

Le noyau augmente la production de chaleur :

- l'accroissement de la consommation cellulaire des lipides : cela constitue la thermogenèse sans frissons qui a lieu dans la graisse brune (graisse ayant des mitochondries produisant peu d'ATP mais beaucoup de chaleur) et les muscles, cela permet de multiplier par quatre le métabolisme de base ;
- le frisson thermique : c'est la manifestation d'un renforcement de l'activité musculaire qui conduit à un tremblement lié à un tétanos imparfait.

A plus long terme, l'adaptation au froid nécessite des modifications morpho-anatomiques : augmentation de la quantité d'aliments absorbés, accumulation de graisse (réserve et isolant), modification du pelage.

### 2-2- Dans une ambiance chaude

L'enveloppe assure l'essentiel de la réponse mais elle sera moins efficace que pour le froid. La réduction de la thermogenèse reste limitée car le métabolisme basal est incompressible (repos, mise à l'abri). La réponse dépend donc de la capacité à évacuer la chaleur.

L'accroissement de la thermolyse est fondamental :

- la réponse comportementale : une plus grande surface corporelle est exposée avec même parfois des animaux qui se lèchent afin d'augmenter la conductance (rats) ;
- la vasodilatation cutanée : elle augmente les pertes par radiation en favorisant le retour veineux de surface ;

- l'évapotranspiration : (elle dissipe de la chaleur car l'évaporation de l'eau est une réaction concentrée) l'évaporation de la sueur assure une bonne perte calorifique mais par contre la sudation (ruissellement) est beaucoup moins efficace (en milieu humide) ;

- la polypnée thermique : elle compense l'absence de glandes sudoripares par augmentation du rythme respiratoire (de 20/min à 150/min chez le chien).

Globalement ces réponses sont peu efficaces ce qui explique que l'intervalle de lutte contre la chaleur est réduit par rapport à celui du froid.

### **2-3- Régulation des réponses thermorégulatrices**

Elle fait intervenir la voie nerveuse et la voie hormonale.

Le contrôle nerveux est une réponse rapide. Le point de départ est formé par les thermorécepteurs centraux (plutôt sensibles au chaud) et périphériques (plutôt sensibles au froid). Ils informent l'hypothalamus, centre thermorégulateur qui met en jeu les différentes réponses que l'on vient de voir.

Le contrôle hormonal a un effet à plus long terme. Il est régi par deux types d'hormones :

- hormones thyroïdiennes : réponse à un froid prolongé, augmentation du métabolisme basal.
- les hormones surrénaliennes : réponse à un stress lié au froid, mobilisent les réserves et réduisent les pertes ;

Ce contrôle hormonal n'intervient que pour lutter contre le froid.

### **3- Régulation de la température chez les hétéothermes**

Un certain nombre de mammifères entrent en vie ralentie pendant l'hiver : ce sont des hétéothermes. Ce phénomène d'hibernation s'accompagne d'une baisse de la température corporelle. Chez les Spermophiles, la température corporelle descend à 4.5°C, le rythme respiratoire à une inspiration par minute et celui du cœur à 2 à 3 pulsations par minute avec une pression artérielle élevée. Tant que la température est comprise entre 12 et 3.3°C, la température corporelle suit celle du milieu. Si elle descend au-dessous de 3.3°C, l'activité métabolique augmente. Le réveil s'effectue lorsque la température extérieure atteint 20°C, la température corporelle augmente alors jusqu'à 17.5°C en 1h30. Trois heures après le début du réveil, il est en pleine activité.

L'hétéothermie est un système moins coûteux que l'homéothermie stricte qui permet le passage de la nouvelle saison. Mais elle est tributaire d'une forte mise en réserve pendant la période favorable et d'un abri sûr pour l'hiver.

La régulation de la température est très coûteuse en énergie pour les organismes. Considérons le cas de deux herbivores. Une Sauterelle poïkilotherme a encore 30 % de l'énergie absorbée disponible après régulation de son milieu intérieur, alors qu'il en reste seulement 2.5 % à la Belette qui est un homéotherme. Cette énergie restante permet la croissance de l'animal et sa reproduction. La régulation de leur milieu intérieur permet aux animaux qui la pratique de survivre à des conditions moins favorables et plus variables, même si elle est coûteuse en énergie. Ils pourront donc coloniser des milieux plus diversifiés.