

# Chapitre B1. L'organisme animal

## Introduction

Les animaux sont des êtres vivants dont la définition est à la fois évidente (car tout le monde sait plus ou moins ce qu'est un animal) et complexe (parce qu'il peut devenir difficile de produire une définition incluant TOUS les animaux) :

- Les animaux sont des organismes pluricellulaires **en général** doués de mouvements (au moins, des mouvements de cellules). Cette définition est peu précise, dans la mesure où d'autres organismes pluricellulaires sont doués de mouvements, comme de nombreuses plantes.
- Les animaux possèdent des **caractères dérivés propres** (qu'on appelle aussi **synapomorphies**) concernant les **types cellulaires**, les **molécules** ou le **métabolisme** :
  - **synapomorphies cellulaires** : les animaux possèdent des cellules musculaires et des cellules nerveuses, et sont les seuls êtres vivants à en disposer
  - **synapomorphies moléculaires** : les animaux possèdent tous du cholestérol, un lipide ayant de nombreuses fonctions, et que l'on verra plus tard dans l'année
  - **synapomorphies métaboliques** : les animaux sont hétérotrophes pour le carbone et l'azote (c'est-à-dire que leur source de matière organique est organique)
- Les animaux peuvent être définis par leur **position systématique**, c'est-à-dire leur place dans **l'arbre du vivant**. Il s'agit alors d'une **définition phylogénétique**. Les animaux constituent un groupe ayant les caractéristiques suivantes :
  - Tous les individus actuels appelés « animaux » ont un ancêtre commun ;
  - L'ensemble des descendants du plus récent des ancêtres communs à tous les animaux sont également des animaux, sans exception.

Ces deux caractéristiques définissent un **groupe monophylétique**, appelé aussi parfois **groupe naturel**, en ce qu'il est défini par les relations de parenté uniquement, indépendamment des choix de classification éventuellement arbitraires.

Le terme **métazoaire** est utilisé indifféremment pour **animal**, et doit être connu.

Les diverses activités biologiques d'un être vivant, et en particulier d'un animal ont été regroupées – artificiellement – en **grandes fonctions** :

- Les **fonctions de nutrition** : elles assurent l'**approvisionnement en molécules et en énergie**, et l'**élimination des déchets**. Attention : respiration, excrétion azotée, circulation sanguine **font partie des fonctions de nutrition**.
- Les **fonctions de reproduction** : elles assurent la **production de nouveaux individus**, et par là même la **perséverance de l'espèce**. Chez les animaux, le principal mode de reproduction est la reproduction sexuée, bien que la reproduction asexuée existe chez de nombreux animaux.
- Les **fonctions de relation** : elles assurent la **communication** et les **interactions** entre l'environnement et l'organisme, que ce soient des relations **interspécifiques** (entre individus d'espèces différentes), **intraspécifiques** (entre individus de la même espèce) ou **abiotiques** (avec le milieu). Il s'agit de l'ensemble des sens et des systèmes permettant l'interaction, comme les déplacements, les systèmes de perception sensorielle et de réaction aux fluctuations du milieu, le système immunitaire, le système nerveux, etc.

Nous verrons ici comment ces fonctions sont réalisées chez un animal choisi comme exemple.

L'exemple imposé par le programme de BCPST est **la Vache**. Pourquoi ce choix ?

- La classe préparatoire BCPST forme essentiellement des étudiants agronomes et vétérinaires, qui se doivent de connaître cet animal omniprésent dans le paysage agricole français.
- La Vache est un animal fondamental pour l'économie française : elle est un maillon indispensable de la production de lait, de viande, de cuir et d'engrais.
- La Vache est un mammifère, et possède donc de nombreuses caractéristiques communes avec l'Homme.

La Vache est l'individu femelle d'une espèce dont le nom latin est **Bos taurus**. Le nom de genre, *Bos*, qui se décline au génitif en *Bovis*, a donné l'adjectif *bovin*, le nom de la famille des *bovidés*, et le nom du jeune mâle châtré : le bœuf. Le nom d'espèce, *taurus*, a donné son nom au mâle de cette espèce, le taureau. Le terme *vache* provient du latin *vacca*, de même sens. Il est resté sous la forme *vaque* en picard et en normand.

## **I. Les fonctions de nutrition**

### **1. La digestion : production et absorption de nutriments**

On appelle **aliments** les substances (souvent solides) qui sont ingérés par l'organisme. Elles diffèrent des **nutriments**, qui désignent des petites molécules et des ions, qui sont absorbés par le tube digestif et transportés par les fluides circulants (sang et lymphé).

Exemple : l'herbe est un **aliment** (pour la vache), tandis que le glucose, les acides aminés et l'ion  $K^+$  sont des **nutriments**.

#### a) Prise alimentaire et rumination

La **bouche** constitue, chez la vache comme chez la quasi-totalité des animaux, l'entrée du **tube digestif**. Chez les Vertébrés, elle comporte un organe constitué d'un muscle et de d'une muqueuse riche en papilles gustatives : la **langue**. Celle-ci permet une **perception chimique** (la gustation) de la nourriture, qui permet à l'animal de choisir la nourriture et de rejeter des aliments indésirables (par exemple, des plantes toxiques). La langue assure cette fonction en même temps que la **muqueuse olfactive** (olfaction), qui détecte les molécules volatiles.

La vache appartient à un groupe de vertébrés (comme tous les mammifères, les oiseaux, les amphibiens, les « reptiles » et la plupart des « poissons ») qui dispose d'une **mâchoire**, c'est-à-dire une pince constituée par un os mobile permettant d'ouvrir ou fermer l'orifice buccal. Pour cette raison, la vache est un **gnathostome** (du grec *gnatho-* la mâchoire, et *-stoma* la bouche : *bouche à mâchoire*).

Comme beaucoup de vertébrés, la vache dispose de **dents**, dont la structure sera vue un peu après. La **denture** constitue l'ensemble des dents (la dentition désigne en revanche **les processus de développement des dents**, et on emploie souvent le mot dentition au lieu de denture. Vous êtes chargés d'engueuler votre dentiste s'il fait l'erreur). La vache, comme de nombreux herbivores, a une denture particulière. Elle peut être notée ainsi :

$$I \frac{0}{3} \quad C \frac{0}{1} \quad PM \frac{3}{3} \quad M \frac{3}{3}$$

Ce mode de représentation désigne (pour chaque **demi-mâchoire**, droite ou gauche) les 4 types de dents typiques des mammifères (I pour incisives, C pour canines, PM pour prémolaires et M pour molaires) ; la fraction désigne le nombre de dents de la mâchoire supérieure (numérateur) et inférieure (dénominateur). On retrouvera cette **formule dentaire** dans le document 1.

La vache a donc 3 incisives et 1 canine au niveau de la mâchoire inférieure, et aucune incisive et aucune canine sur la mâchoire supérieure. En revanche, on peut noter que la lèvre supérieure de la vache (et de tous les ruminants) possède un épaississement de la peau (on dit qu'elle **cornée**) qui permet à l'animal de **pincer** l'herbe entre la lèvre inférieure et les 8 dents de la mâchoire inférieure.

Lors de la **prise alimentaire**, l'herbe (qui est l'alimentation principale de la vache) est avalée après une **mastication rudimentaire**. La mastication (aussi appelée **trituration**) se fait plus tard, lors d'un processus appelé **rumination**.

Quel peut-être l'intérêt de ce broyage différé ? Dans la **chaîne alimentaire** (ou **chaîne trophique**), la vache a le statut de **proie**, du moins lorsqu'elle est en liberté. La prise alimentaire dans une pâture se fait à

découvert, et elle est donc à la merci des prédateurs naturels (dans nos contrées, il s'agit du loup, et éventuellement de l'ours, bien que ces prédateurs soient aujourd'hui rares). Une prise alimentaire rapide sans mastication permet à la vache d'ingurgiter de grandes quantités d'herbe tout en diminuant le risque d'être repérée par un prédateur. Il s'agit donc d'une adaptation comportementale sélectionnée au cours de l'évolution car elle permet une meilleure survie.

Une fois la prise alimentaire effectuée, la vache se met en sécurité dans un lieu moins voyant (sous un arbre par exemple) et commence la rumination. La vache a un tube digestif plus complexe que celui de beaucoup de mammifères. Elle possède **quatre estomacs** ; on dit pour cette raison qu'elle est **polygastrique**. Le premier estomac (du pôle antérieur au pôle postérieur de l'animal) est la **panse**, aussi appelé **rumen**. C'est de très loin l'estomac le plus volumineux. A lui seul, il occupe 70 % du volume total du tube digestif, ce qui est considérable. Cela représente un volume moyen (selon les races) de **125 L** ! C'est dans le rumen que, via l'**oesophage**, l'herbe est acheminée lors de la prise alimentaire.

Passée la prise alimentaire, la vache régurgite, toujours via l'oesophage, une partie du contenu de la panse, et triture très finement l'herbe. Nous allons nous focaliser désormais sur la structure de la mâchoire et sur les dents jugales (prémolaires et molaires) pour comprendre les adaptations qui permettent cette trituration. L'observation d'une vache en train de ruminer montre que la mâchoire inférieure se déplace latéralement : la vache ne broie donc pas sa nourriture comme le fait un Humain par exemple. Comme cette mastication latérale est-elle possible ?

Les dents sont constituées de deux tissus minéralisés : la dentine et l'émail. La dentine est un tissu vivant, qui ressemble à l'os. Les cellules de la dentine sécrètent une **matrice extracellulaire** riche en un composé minéral appelé **hydroxyapatite**. Il s'agit d'un phosphate **hydraté de calcium**, de formule  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ . C'est l'hydroxyapatite qui rend ce tissu très **rigide**. La dentine est constituée de 80 % d'hydroxyapatite en moyenne (plus que l'os), ce qui la rend très résistante. L'émail de la dent est un tissu mort (qui ne se renouvelle donc pas), constitué à 90 % d'hydroxyapatite. Sa dureté est donc plus grande encore que la dentine (c'est d'ailleurs la substance biologique la plus dure existante). On peut voir sur le document 1 que les dents jugales (prémolaires et molaires) sont constituées de crêtes d'émail (en noir sur le schéma), qui sont **saillantes** par rapport à la dentine, en raison de la différence de dureté des différents tissus. De plus, ces crêtes sont en forme de demies-lunes (on parle de dents **sélénodontes**) globalement orientées **dans le sens d'allongement de la mâchoire**.

La mâchoire est reliée au crâne par une articulation. Le **condyle** est la partie arrondie du dentaire (l'os de la mâchoire) qui est impliquée dans cette articulation. On constate que le condyle est très allongé latéralement, ce qui permet à la vache de décaler latéralement sa mâchoire sans risquer de la luxer (ce dont un Humain ou une Souris serait totalement incapable). Enfin, le **processus coronoïde** est une partie du dentaire impliquée dans l'implantation des muscles masticateurs (en particulier le **muscle masséter**), qui sont également reliés au crâne. Il est très développé chez la vache, ce qui permet une grande puissance de la mastication latérale évoquée.

La mastication latérale, associée à des crêtes d'émail perpendiculaires au sens de mastication permet à la denture jugale de jouer le rôle d'une **râpe**, qui déchiquète très finement les végétaux ruminés.

#### b) Digestion microbienne

Chez un Mammifère omnivore, comme l'Humain ou le Porc, l'estomac est unique, et il produit des enzymes permettant la transformation du bol alimentaire (nourriture broyée) en nutriments. Chez la vache, on constate que **la panse ne produit aucune enzyme digestive**. Comment est réalisée la digestion chez la vache ?

Pour le comprendre, il faut d'abord de poser la question de la composition chimique de l'aliment principal de la vache : l'herbe. L'herbe, et plus généralement les végétaux de petite taille, que l'on trouve dans une pâture, est constituée de cellules végétales. Les cellules végétales sont en général de grande taille, et la majeure partie de la cellule (90%) est occupée par une **vacuole**, très riche en eau. La part du cytoplasme riche en

nutriments est donc très mince ; on y trouve un peu de protéines, quelques glucides comme le saccharose ou l'amidon, des acides nucléiques, des lipides membranaires... En revanche, la **matrice extracellulaire** (réseau de fibres qui entoure la cellule, aussi appelée **paroi**) est très riche en **cellulose**.

La cellulose est un **polymère glucidique**, c'est-à-dire une **molécule de très grande taille** (comportant plusieurs milliers d'atomes) appartenant à la famille des glucides. Mais qu'est-ce qu'un glucide ? Nous verrons dans le chapitre B2 ce qu'on appelle exactement un glucide ; on va ici se focaliser sur un des principaux glucides existant chez les êtres vivants : le **glucose**. Il a pour formule brute  $C_6H_{12}O_6$  et il en existe deux formes : le **glucose  $\alpha$**  et le **glucose  $\beta$**  (document 2a).

La cellulose est un **homopolymère** (tous les **monomères**, ou **unités de base**, sont **identiques**) de **glucose  $\beta$** . Sa structure est donnée dans le document 2a. On pourra noter que chaque unité de glucose  $\beta$  est inversée de  $180^\circ$  par rapport à la précédente, ce qui a pour conséquence que la molécule est **strictement linéaire**. Elle forme donc des **fibres**, qui sont à la fois très résistantes mécaniquement (d'où leur présence dans la paroi des cellules végétales), mais également **très résistantes à l'action enzymatique** : les animaux ne possèdent pas d'enzymes capables d'hydrolyser la cellulose. La vache ne peut donc, *a priori*, pas digérer la cellulose, qui est pourtant le constituant principal de l'herbe !

On constate que la panse contient de nombreux microorganismes, appartenant à des groupes divers, avec en particulier des microorganismes **capables de produire la cellulase**, qui est **l'enzyme responsable de l'hydrolyse de la cellulose**. En particulier, on trouve en moyenne :

- 1 kg d'**Eubactéries**, ayant une activité **cellulase** et **amylase** (hydrolyse de l'amidon) ;
- 2 kg de ciliés, qui sont des **Eucaryotes unicellulaires**, ayant aussi une activité **cellulase** et **amylase**, mais également une activité de fermentation que nous allons voir.
- 1 kg de **champignons microscopiques**, ayant aussi une activité **cellulase** et **amylase**.
- des **bactéries méthanogènes**, appartenant au groupe des Archées (qui sont avec les Eubactéries et les Eucaryotes un des trois grands règnes du vivant), qui comme leur nom l'indique, produisent du méthane ( $CH_4$ ).

La cellulose (mais également l'amidon, qui est polymère d' $\alpha$ -glucose) est **hydrolysée** par les enzymes produites par l'ensemble de l'écosystème microbien (microbe est synonyme de microorganisme), en particulier les cellulases et les amylases. L'hydrolyse de ces polymères libère les **monomères de glucose**. Bien entendu, le glucose étant une ressource utilisable par ces microorganismes, il ne peut pas être assimilé par la vache : ce sont les microorganismes qui absorbent et consomment le glucose. On va voir ici de quelle façon ils l'utilisent, et quel sera l'intérêt pour la vache de la présence de ces microorganismes.

Avant d'aller plus loin, quel est l'intérêt pour la vache de mastiquer l'herbe si tout le travail de digestion est en réalité opéré par des microorganismes ? La mastication, en fragmentant les particules, permet d'augmenter la surface disponible pour l'attaque par les microorganismes. Elle permet donc l'optimisation de l'action de microorganismes.

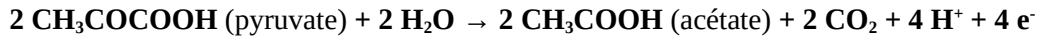
On va dresser un panorama simplifié des réactions métaboliques qui se produisent dans le cytoplasme des Ciliés et des Archées méthanogènes. Une partie du glucose va être **transformé en d'autres molécules**, permettant aux microorganismes de synthétiser l'ensemble de la matière organique dont ils ont besoin. Une partie du glucose va également être **dégradée**.

Le glucose est une molécule **réduite** (riche en électrons), dont l'oxydation libère de l'énergie. Chez tous les êtres vivants, et en particulier chez les Ciliés, le glucose peut être dégradé dans une voie métabolique appelée **glycolyse**. Il est alors transformé en pyruvate, de formule  $CH_3COCOOH$ . On peut écrire cette transformation :

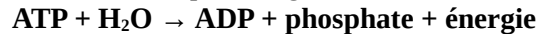


Il s'agit donc d'une **demi-équation d'oxydoréduction**, et lorsqu'elle est écrite dans ce sens, il s'agit d'une **oxydation du glucose en pyruvate**.

Chez les Ciliés de la panse, le pyruvate est oxydé ultérieurement selon l'équation suivante :

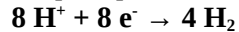


Chacune de ces deux réactions d'oxydation libère de l'énergie. Cette énergie est convertie par la cellule sous forme d'**adénosine triphosphate**, ou ATP. Cette molécule est dite à haut potentiel d'hydrolyse, c'est-à-dire que l'hydrolyse de la liaison entre le 2<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> phosphate, qui produit de l'adénosine **diphosphate** et un phosphate libre, dit inorganique, libère beaucoup d'énergie :



La production d'ATP par l'oxydation du glucose en pyruvate, et par l'oxydation du pyruvate en acétate permet donc à la cellule de réaliser de nombreuses réactions qui nécessitent de l'énergie.

Les 8 H<sup>+</sup> et les 8 électrons libérés sont combinés pour produire un gaz (le dihydrogène), selon la réaction :



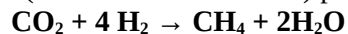
Ainsi, on peut écrire le bilan de ces trois réactions :



On peut formuler ce bilan par des phrases :

- Les Ciliés consomment et détruisent le glucose libéré par l'action de l'amylase et de la cellulase
- Les Ciliés produisent trois déchets : l'acétate, le CO<sub>2</sub> et le H<sub>2</sub>.
- Les Ciliés retirent de l'énergie de ces réactions, sous forme d'ATP, ce qui leur permet de proliférer, c'est-à-dire d'augmenter leur population.
- Comme on l'a vu plus haut, une partie du glucose est transformée en d'autres molécules, ce qui permet aux microorganismes de produire toute leur matière organique.

La vache libère par éructation (rots) plusieurs centaines de litres de gaz par jour. Parmi ces gaz, on trouve du CO<sub>2</sub>, mais également du méthane, mais pas de H<sub>2</sub>. Comment l'expliquer ? Comme on l'a vu, des Archées méthanogènes vivent également dans la panse de la vache. Elles utilisent le H<sub>2</sub> et une partie du CO<sub>2</sub> produit par l'activité des autres microorganismes (et notamment les ciliés) pour les transformer en méthane :



Cette réaction libère également de l'énergie, ce qui permet aux Archées méthanogènes de produire de l'ATP. Ces bactéries utilisent également le CO<sub>2</sub> comme source de carbone pour synthétiser leur matière organique ; on dit que ce sont des organismes autotrophes pour le carbone. Production d'énergie et de matière organique permet donc la prolifération de ces bactéries. Cette activité métabolique permet également d'expliquer l'absence de rejet de H<sub>2</sub> mais le rejet de méthane par éructation.

On retiendra de l'activité métabolique de ces deux types de microorganismes :

- Le glucose est entièrement utilisé par les microorganismes : il permet d'augmenter la biomasse microbienne.
- Des déchets sont rejetés : deux gaz (le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>), qui sont libérés par éructation, mais également de l'acétate. En réalité, deux autres déchets sont produits et libérés dans la panse : le propionate et le butyrate, qui sont proches de l'acétate. Ces trois molécules appartiennent au groupe des **acides gras volatils**. On verra juste après l'intérêt de ces acides gras volatils (qu'on appellera AGV par la suite).

L'activité microbienne de la panse a quelques rôles annexes :

- Des molécules toxiques absorbées par la vache peuvent être détruites par les microorganismes, ce qui permet aux ruminants de consommer une très grande variété de plantes, y compris des plantes normalement toxiques pour d'autres mammifères. C'est une des raisons pour lesquelles les intoxications sont beaucoup plus courantes pour les chevaux et les porcs (non ruminants) que pour les vaches, chèvres et brebis (ruminants).
- Les microorganismes peuvent produire des molécules essentielles à la physiologie de la vache, comme par exemple la vitamine B12.

Avant d'aller plus loin, une dernière question n'a pas été évoquée : celle des protéines. Les protéines sont un des grands types de molécules présents chez les êtres vivants. Elles sont constituées d'acides aminés, qui sont des molécules organiques comportant au moins un atome d'**azote** (impliqué dans la fonction **amine**). Là

encore, ce sont les microorganismes qui s'accaparent l'azote qui pénètre dans la panse. Il peut avoir plusieurs origine :

- Il y a un tout petit peu de protéines dans l'herbe ; ces protéines sont hydrolysées en acides aminés par les microorganismes (voir c)), qui récupèrent les acides aminés et les utilisent pour faire leurs propres protéines.
- L'eau de boisson de la vache contient en quantité variable des ions minéraux contenant de l'azote, comme par exemple le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ). Une fois dans la panse les microorganismes transforment le nitrate en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et l'utilisent pour **aminer des molécules organiques initialement non aminées**, via le complexe enzymatique GS-GOGAT. Cette amination se fait en deux temps :
  - La **glutamine synthase** (GS) catalyse la réaction suivante : glutamate +  $\text{NH}_3 \rightarrow$  glutamine
  - La **glutamine oxyglutarate aminotransférase** (GOGAT) catalyse la réaction suivante :  $\alpha$ -cétoglutarate + glutamine  $\rightarrow$  2 glutamate ; l' $\alpha$ -cétoglutarate est produit par les microorganismes, et est donc disponible.
  - Le bilan est donc le suivant :  $\text{NH}_3 + \alpha$ -cétoglutarate  $\rightarrow$  glutamate. Or, le glutamate est un acide aminé : cette réaction permet donc d'augmenter la quantité d'acides aminés dans la panse à partir d'une source non organique d'azote présente dans l'environnement.
- Enfin, une source d'azote tout à fait originale provient de la salive de la vache. Il se trouve que les animaux rejettent, comme on le verra dans le 4., des déchets azotés, issus du métabolisme des acides aminés. Chez la plupart des mammifères, la totalité de cet azote est libérée par l'urine, sous forme d'urée ( $\text{H}_2\text{N-CO-NH}_2$ ). Chez les ruminants, dont la vache, une partie de cette urée est libérée dans la salive. Une fois avalée, elle est hydrolysée par les microorganismes de la panse, selon la réaction suivante :  $\text{H}_2\text{N-CO-NH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{NH}_3$ . Cet ammoniac est ensuite utilisé par les bactéries pour synthétiser de nouveaux acides aminés. En somme, plutôt que de jeter son azote dans l'environnement via l'urine, la vache le recycle en assurant une nutrition azotée aux microorganismes de sa panse.

On retiendra le bilan suivant : **les microorganismes de la panse transforment l'herbe et les molécules azotées de l'alimentation de la vache, ce qui leur permet de proliférer ; ils libèrent des déchets, comme les acides gras volatils, qui sont solubles dans la panse.**

Les deux estomacs suivants ont un rôle purement mécanique. Le **bonnet**, aussi appelé **réticulum**, et le **feuillet**, aussi appelé **omasum**, ont une muqueuse ayant des ornements permettant de filtrer le contenu de la panse, de telle sorte que seule la fraction liquide et les petites particules sont admises dans le 4<sup>e</sup> et dernier estomac, la **caillette**, aussi appelée **abomasum**. Les plus gros éléments sont refoulés et restent dans la panse : ils seront alors ruminés jusqu'à être fragmentés en éléments suffisamment fins.

### c) Digestion chimique

Une **enzyme** est une **protéine** ayant une **activité catalytique**, c'est-à-dire qu'elle a la capacité à accélérer les réactions chimiques. Les enzymes sont les meilleurs catalyseurs que l'on connaisse, et la vitesse peut être augmenté d'un facteur  $10^{10}$ , ce qui est considérable. En pratique, la plupart des réactions chimiques non catalysées sont si lentes qu'on peut considérer qu'elles n'ont pas lieu, et la catalyse permet alors à une réaction d'avoir lieu de façon extrêmement rapide.

La caillette (le 4<sup>e</sup> estomac de la vache) est homologue de l'estomac des mammifères monogastriques (chez l'Humain ou la souris par exemple), c'est-à-dire qu'elle a la même origine embryonnaire. Elle produit et libère des ions  $\text{H}^+$ , qui permettent au pH de la caillette d'être particulièrement bas (de l'ordre de 2). Elle produit également des enzymes diverses, parmi lesquelles :

- Du **lysozyme**, qui hydrolyse spécifiquement le **peptidoglycane**, qui est le composé principal de la **paroi des bactéries**. Le lysozyme provoque donc la mort des bactéries qui avaient proliféré dans la panse.
- Des **protéases**, et notamment la **pepsine**. Cette enzyme est abondamment produite par la muqueuse gastrique, et a un maximum d'activité à pH 2,5, soit un pH très acide. Comme toute protéase, elle permet l'hydrolyse de la **liaison peptidique**, qui relie deux acides aminés dans une protéine (document 2A). La protéase contribue à la mort de la plupart des microorganismes qui pénètrent

dans la panse, par destruction de leurs protéines.

- Des **glycosidases** (qui hydrolysent les sucres complexes), qui hydrolysent certains polymères glucidiques qui composent les microorganismes.

A l'issue de l'estomac, le contenu du tube digestif est riche en nutriments, libérés par l'action enzymatique, et la plupart des microorganismes ont été tués. Le chyme (liquide présent dans l'estomac) passe alors de façon contrôlée le **sphincter pylorique**, et pénètre dans l'intestin grêle. Il va recevoir alors les sécrétions du **pancréas** et du **foie**, via la **vésicule biliaire**.

Le pancréas exocrine sécrète des ions  $\text{HCO}_3^-$ , qui contribuent à augmenter le pH, qui est alors autour de 7,5. Il synthétise également deux enzymes :

- La **trypsine**, qui est une protéase. Elle hydrolyse la liaison peptidique, comme la pepsine, mais n'agit pas au niveau des mêmes acides aminés que la pepsine. Elle a donc un rôle complémentaire à celui de la pepsine. Elle contribue à hydrolyser les protéines ayant résisté à l'action des protéases gastriques.
- La **lipase**, qui, comme son nom l'indique, hydrolyse les lipides. Plus précisément, elle hydrolyse la liaison ester entre le glycérol et l'acide gras des glycérides, et notamment des triglycérides, qui sont les principaux représentants des corps gras.

Le **foie** produit la bile, qui est stockée dans la vésicule biliaire, et expulsé au moment du repas via le **canal cholédoque** dans l'intestin. La bile contient des déchets, comme par exemple les produits de dégradation des hèmes de l'hémoglobine, mais également des **sels biliaires**. Ces molécules, qui sont dérivées du cholestérol, ont des propriétés amphiphiles (un pôle hydrophile et un pôle hydrophobe) et favorisent la formation de **micelles de graisses**, augmentant la surface disponible pour l'action de la lipase.

A l'issue de cette digestion, le liquide du tube digestif est riche en molécules solubles :

- Pour la panse : des acides gras volatils.
- Pour l'intestin grêle : des acides aminés, quelques sucres simples, des acides gras émulsionnés.

On va voir ici quels sont les mécanismes permettant leur absorption par l'organisme, au niveau de la paroi de la panse et de l'intestin grêle.

#### d) Absorption active et contrôlée des nutriments

Le tube digestif est revêtu, sur sa partie interne, par un tissu (c'est-à-dire un ensemble de cellules) qui fait la jonction entre le milieu externe (la lumière du tube) et le milieu interne (la paroi du tube). Ce tissu, constitué de cellules toutes **jointives**, est appelé **tissu épithélial**, ou **épithélium**. Pour l'intestin, les cellules de cet épithélium sont appelées **entérocytes** (de *entero-* l'intestin, et *-cyte* la cellule).

C'est à travers cet épithélium que les nutriments pénètrent dans l'organisme. Les acides gras volatils sont absorbés par l'épithélium de la panse, alors que les glucides (dont le glucose), les lipides et les acides aminés sont absorbés par l'épithélium intestinal.

L'intestin grêle a une surface interne beaucoup plus importante que la surface externe. Cette augmentation de la surface est permise par trois éléments structuraux :

- Les **plis circulaires**, de dimensions centimétriques à millimétriques, qui sont des replis de la muqueuse en forme d'anneau. L'augmentation de surface due aux plis circulaires est d'un facteur 10 environ.
- Les **villosités**, de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  à 1 mm. Il s'agit de replis fins de l'épithélium (tissu de revêtement interne de l'intestin). L'augmentation de surface due aux villosités est d'un facteur 20 environ.
- Les **microvillosités**, qui ont une échelle cellulaire, et sont des replis très fins de la membrane plasmique des cellules de l'épithélium intestinal : les **entérocytes**. L'augmentation de surface due aux microvillosités est d'un facteur 20 environ.

Au total, l'augmentation de surface de l'intérieur de l'intestin est donc d'un facteur 4000 par rapport à un

tube lisse de même diamètre.

Au niveau de la panse, des millions de papilles d'une dimension de quelques millimètres, et des microvillosités au niveau des cellules épithéliales contribuent également, comme pour l'intestin, à augmenter la surface de la muqueuse de la panse.

Les échanges au travers d'une surface perméable sont décrits par une loi physique : la **loi de Fick**. Elle donne la valeur du **flux molaire  $j$**  à travers une paroi d'**épaisseur  $e$** , de **surface  $S$** , et pour un **coefficient de diffusion  $D$** .

$$j = -DS \frac{\Delta C}{e}$$

Comme on peut le remarquer, le flux est proportionnel à la surface. L'augmentation de la surface qui a été constatée précédemment pour l'échangeur que constitue cet épithélium permet donc d'augmenter le flux de molécules à travers cet épithélium.

On notera un signe « - » dans la loi de Fick. Il vient du fait que le flux de matière (positif pour plus de commodité) se fait spontanément **dans le sens des concentrations décroissantes**, c'est-à-dire que les molécules qui diffusent le font depuis le compartiment le plus concentré vers le compartiment le moins concentré

Quelle est l'importance des acides gras volatils dans la nutrition de la Vache ? Les AGV sont **la principale ressource carbonée de la vache**, puisqu'ils représentent 70 % de la nutrition carbonée de la Vache. Les 30 % restants sont assurés par les glucides, les lipides, les acides aminés et les acides nucléiques. Cela permet d'expliquer que la glycémie à jeun de la Vache soit faible (elle n'est que de 0,6 g.L<sup>-1</sup>, contre 1 g.L<sup>-1</sup> pour l'Humain). L'absorption des acides aminés, qui se fait en revanche essentiellement à travers l'épithélium de l'intestin, compte pour 95 % de l'apport azoté de la vache. Il convient donc de considérer la panse et l'intestin comme deux organes absorbants à part entière, et aucun des deux n'a une importance négligeable. Ceci n'est pas vrai pour les animaux non ruminants, où l'absorption des nutriments est presque exclusivement assurée par l'intestin grêle.

Revenons aux modalités de l'absorption (car nous n'avons pas tout dit, loin s'en faut !). Lors de l'arrivée du contenu du tube digestif au côlon (gros intestin), on constate que la totalité du glucose, des acides aminés, des lipides, etc., ont été absorbés. Reprenons la loi de Fick : le flux est proportionnel à la différence de concentration  $\Delta C$ . Cela signifie donc que ce flux doit être nul si  $\Delta C$  est nul, donc si les concentrations entre la lumière du tube digestif et l'intérieur de l'organisme sont les mêmes. Comme il y a toujours du glucose, des acides aminés, etc., à l'intérieur de l'organisme, on ne peut pas avoir à la fois  $\Delta C$  nul et  $C = 0$  dans la lumière du tube. Cela montre donc que d'autres modalités que la diffusion simple existent, qui permettent l'absorption de la **totalité** des nutriments présents dans le tube digestif.

La membrane plasmique est très imperméable aux molécules organiques solubles dans l'eau, comme on le verra dans le chapitre B3. Des **transporteurs**, qui sont des protéines transmembranaires, permettent le passage de molécules d'un côté à l'autre de la membrane. On prendra à présent l'exemple du glucose, sachant que des transporteurs existent pour la quasi-totalité des molécules solubles.

- Certains transporteurs (les **perméases**) **facilitent** le passage spontané du glucose, en rendant la membrane perméable au glucose spécifiquement. On verra les modalités de ces transports dans le chapitre B4. Le glucose passe toujours strictement dans le sens du plus concentré vers le moins concentré, sans qu'il n'y ait besoin d'apport d'énergie extérieure. On parlera donc de **transport passif**.
- Certains transporteurs sont capables de transporter des molécules **du moins concentré vers le plus concentré** (on dit que le transport se fait dans le sens contraire du gradient de concentration). De la même façon qu'on a besoin d'énergie pour remonter le courant d'une rivière, ce type de transport nécessite de l'énergie. Là encore, deux cas de figure :
  - L'**ATP** (adénosine triphosphate, déjà rencontrée) peut apporter l'énergie nécessaire, exactement comme on utiliserait de l'essence pour faire fonctionner une pompe et expulser de l'eau d'une



cave. Ce type de transport est appelé **transport actif primaire**, et le transporteur est appelé **pompe**. Il s'agit dans la très grande majorité des cas de transport d'ions minéraux ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ...). Ce faisant, les pompes sont capables de créer un déséquilibre ionique transmembranaire.

- Un **transporteur actif secondaire** peut utiliser la différence de concentration (ou gradient) créée par un transporteur actif primaire (comme une différence de concentration en  $\text{Na}^+$  par exemple) de façon à faire passer le glucose du moins concentré vers le plus concentré, en récupérant l'énergie libérée par le passage du  $\text{Na}^+$  du plus concentré vers le moins concentré.

L'entérocyte dispose de 3 transporteurs permettant d'absorber le glucose :

- Un **transporteur passif (perméase)** à glucose, appelé **GLUT4**
- La **pompe à  $\text{Na}^+/\text{K}^+$** , qui fait sortir de la cellule 3  $\text{Na}^+$  et entrer 2  $\text{K}^+$ , dans le sens contraire de leur gradient.
- Un transporteur actif secondaire  $\text{Na}^+/\text{glucose}$ , qui fait entrer le glucose (contre son gradient) et entrer le  $\text{Na}^+$  (dans le sens de son gradient). Ce transporteur s'appelle **sodium glucose linked transporter** (transporteur couplant sodium et glucose), ou **SGLT**.

L'ensemble du fonctionnement de des trois transporteurs est résumé dans le document 8.

Les tissus épithéliaux, et en particulier l'épithélium intestinal, dispose également de nombreuses jonctions, qui sont impliquées dans l'absorption des nutriments. Les cellules sont liées **mécaniquement entre elles** et à la **matrice extracellulaire**.

Les **desmosomes**, dont la structure est donnée dans le document 13, sont des jonctions intercellulaires mettant en jeu une protéine intracellulaire (la **desmoplakine**) et des protéines transmembranaires (les **cadhérines**). Du côté intracellulaire, la desmoplakine est reliée à des fibres protéiques constituant le **cytosquelette**. Les desmosomes permettent aux cellules d'être fermement ancrées à leur voisines, si bien que le tissu ne peut pas se déchirer. De même, les **hémidesmosomes** permettent d'ancrer les cellules à la matrice extracellulaire basale (aussi appelée lame basale), ce qui permet l'**ancrage du tissu au reste des tissus de l'organisme**. De cette façon, la barrière que constitue l'épithélium garde son intégrité et peut donc contrôler finement l'absorption de glucose et d'autre nutriments.

Les **jonctions étanches**, ou **jonctions serrées**, rapprochent les membranes de deux cellules adjacentes, jusqu'à une distance de l'ordre du nanomètre. On pense que dans certains cas, les deux membranes des cellules fusionnent partiellement. Ces jonctions sont permises par un couple de protéines transmembranaires (**occludine** et **claudine**). Ces jonctions ceinturent totalement chaque entérocyte, et empêchent toute molécule et *a fortiori* tout pathogène d'utiliser l'espace entre les cellules pour entrer ou sortir de l'organisme. Ces jonctions assurent donc l'étanchéité du tissu, et renforcent le rôle des cellules dans le contrôles des entrées et sorties de l'organisme (et notamment, pour l'absorption des nutriments).

## 2. La respiration : échanges gazeux avec l'environnement

### a) L'organisme animal a un métabolisme respiratoire

Comme tous les animaux, la vache est un organisme **hétérotrophe**, c'est-à-dire qu'elle **prélève de la matière organique** dans son environnement, et l'utilise comme **source de matière** et **source d'énergie**. L'énergie contenue dans la matière organique qui constitue l'alimentation, comme le glucose par exemple, est libérée par son **oxydation en  $\text{CO}_2$** . L'oxydation totale du glucose en  $\text{CO}_2$  consiste en une série de réactions chimiques appelée **respiration cellulaire**. Elle consiste en trois grandes voies métaboliques, chacune constituée de plusieurs réactions chimiques :

- La **glycolyse**, qui est l'oxydation de glucose en pyruvate ; elle a lieu dans le **cytosol**. Son bilan est le suivant :  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  (glucose)  $\rightarrow$  2  $\text{CH}_3\text{COCOOH}$  (pyruvate) + 4  $\text{e}^-$  + 4  $\text{H}^+$
- Le cycle de Krebs, qui est l'oxydation du pyruvate en  $\text{CO}_2$ . Elle a lieu dans la **matrice mitochondriale** (compartiment le plus interne de la mitochondrie). Son bilan est le suivant : 2  $\text{CH}_3\text{COCOOH}$  (pyruvate) + 6  $\text{H}_2\text{O}$   $\rightarrow$  6  $\text{CO}_2$  + 20  $\text{e}^-$  + 20  $\text{H}^+$
- La **phosphorylation oxydative** (ou **chaîne de transport d'électrons**), qui est la réduction du

dioxygène en H<sub>2</sub>O, ce qui consomme les électrons et H<sup>+</sup> produits par les deux premières étapes. Elle a lieu dans la **membrane interne de la mitochondrie**. Son bilan est le suivant : **24 e<sup>-</sup> + 24 H<sup>+</sup> + 6 O<sub>2</sub> → 12 H<sub>2</sub>O**

Chacune de ces trois voies métabolique produit de l'**ATP**, qui permet aux cellules d'effectuer leurs travaux cellulaires (mouvements, déplacements de vésicules, synthèse de protéines, etc.).

Le bilan de la respiration cellulaire peut s'écrire en combinant les bilans de chacune des trois voies métaboliques qui la composent : **C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (glucose) + 6 O<sub>2</sub> → 6 CO<sub>2</sub> + 6 H<sub>2</sub>O**. Comme on le voit, cette réaction **consomme du dioxygène**, et **produit du CO<sub>2</sub>**. Chacune de ces deux molécules, qui sont des **gaz**, doit donc nécessairement être acheminée aux cellules (pour l'O<sub>2</sub>) ou rejetée à l'extérieur (pour le CO<sub>2</sub>). C'est l'**appareil respiratoire** qui remplit cette fonction.

b) Le poumon permet des échanges efficaces entre sang et atmosphère

Le poumon est un organe pair (un poumon à droite et un poumon à gauche). Chaque poumon est constitué d'un un plusieurs lobes (variable selon les espèces). Les parties supérieures sont constituées de canaux épais, comportant des épaissement annulaires de cartilage : ce sont les **voies aériennes**. Depuis la plus grande, la **trachée**, elles se divisent en deux **bronches**, qui elles mêmes se ramifient en milliers de **bronchioles**. Aux extrémités des bronchioles se trouvent les **alvéoles pulmonaires**, des sacs borgnes (ne comportant qu'une seule ouverture), qui sont remplis et vidés grâce aux mouvements respiratoires.

Les mouvements respiratoires sont permis par les **muscles respiratoires**, et en particulier le **diaphragme**, qui a été vu en TP, et les **muscles intercostaux** (littéralement, entre les côtes). Ces muscles permettent l'**inspiration** (remplissage du poumon), alors que l'**expiration** est **passive** (une simple détente des muscles provoque le vidage du poumon). Toutefois, la respiration forcée (en cas de besoin accru de dioxygène, pendant un effort physique par exemple) autorise l'expiration active grâce à d'autres muscles. Les poumons sont solidaire de la cage thoracique grâce à la **plèvre**, qui est un tissu constitué d'une double membrane (l'une côté poumon, l'autre côté cage thoracique). Les mouvements respiratoires permettent de renouveler l'air des alvéoles, et de maintenir un taux de CO<sub>2</sub> relativement bas, et un taux d'O<sub>2</sub> relativement élevé. Les détails du fonctionnement du poumon, et une mise en regard du poumon avec les systèmes respiratoires d'autres animaux sera vu en BCPST2.

L'échangeur pulmonaire à proprement parler est constitué par l'**épithélium pulmonaire**. Il est constitué de deux types de cellules :

- Les pneumocytes I (pneumocyte signifie littéralement *cellule du poumon*), qui sont de loin les plus abondants.
- Les pneumocytes II, plus rares, et donc on verra le rôle un peu après.

A proximité directe de l'épithélium, côté basal, on trouve de nombreux capillaires sanguins. Le sang qui arrive au poumon provient du coeur droit. Il est relativement appauvri en O<sub>2</sub> et enrichi en CO<sub>2</sub>. Au contraire, la lumière de l'alvéole est riche en O<sub>2</sub> et pauvre en CO<sub>2</sub>. Il existe donc un **gradient de pression partielle en O<sub>2</sub> et en CO<sub>2</sub>** (parfois appelé par abus de langage *gradient de concentration*). C'est ce gradient qui permet les échanges de gaz respiratoire entre le sang d'un côté et la lumière de l'alvéole de l'autre. Contrairement aux petites molécules organiques (glucoses, acides gras...), les gaz respiratoires sont de **très petites molécules**, et ils peuvent **traverser les membranes cellulaires** sans nécessiter de transporteur. La diffusion est donc strictement passive, et elle obéit à la loi de Fick. On rappelle cette loi (avec le **flux molaire j** à travers l'épithélium d'**épaisseur e**, de **surface S**, et pour un **coefficient de diffusion D**, propre à chaque gaz) :

$$j = -DS \frac{\Delta C}{e}$$

Comme nous l'avons déjà analysé pour l'absorption dans l'intestin, on note que le flux augmente avec la surface et avec l'inverse de l'épaisseur. Quelles sont la surface et l'épaisseur de l'échangeur pulmonaire ?

Les nombreuses ramifications des bronchioles, et les millions d'alvéoles permettent d'assurer une surface impressionnante de **300 m<sup>2</sup>** pour le poumon de la vache (soit la surface de 15 chambres d'internat, alors que le poumon ne mesure que 50 cm). L'épaisseur de l'échangeur est de l'ordre d'**une dizaine de µm**, ce qui est l'ordre de grandeur du diamètre d'une seule cellule. On peut donc affirmer que la **surface très grande** et l'**épaisseur très petite** de l'échangeur **optimisent les échanges gazeux**, en vertu de la **loi de Fick**.

Les échanges gazeux ont lieu à travers les pneumocytes I. Mais à quoi servent les pneumocytes II ? La taille des alvéoles (quelques dizaines à centaines de micromètres) les rend sujettes au **collapsus**, c'est-à-dire un écrasement spontané expliqué par les forces exercées par la **tension superficielle de l'eau** qui tapisse la paroi de l'alvéole (c'est un phénomène proche la capillarité). Les pneumocytes II sécrètent une substance appelée **surfactant** qui diminue considérablement la tension superficielle de l'eau, et empêche le collapsus. Ce surfactant est produit, au cours du développement, à la fin de la gestation, si bien que les bébés nés grands prématurés risquent ce collapsus par manque de surfactant, et peuvent souffrir du syndrome de détresse respiratoire. On traite cette affection entre autre par l'injection directement via la trachée d'un surfactant artificiel.

### 3. La circulation : transports des nutriments et gaz respiratoires

#### a) La double circulation optimise la fonction respiratoire du sang

Le sang est un liquide constitué d'une fraction aqueuse et d'éléments en suspension :

- la fraction aqueuse est le **plasma**. Il contient des molécules solubles (les nutriments solubles comme le glucose, des acides aminés, les sels minéraux)
- la fraction en suspension est constituée par les cellules sanguines (aussi appelés *éléments figurés*), c'est-à-dire les leucocytes (globules blancs) et les hématies (globules rouges), mais aussi les plaquettes et les lipoprotéines (que l'on verra plus tard).

Le sang circule dans le **réseau vasculaire**, constitué des artères et artérioles, des capillaires, et des veinules et veines. Il est prisonnier de ce réseau, que l'on appelle donc **système circulatoire fermé**. On verra en travaux pratiques que cette caractéristique est particulière aux vertébrés, et que de nombreux autres organismes (comme les Arthropodes par exemple) ont un système circulatoire ouvert. Tout épanchement du sang à l'extérieur du réseau vasculaire constitue une hémorragie, qui peut avoir des conséquences très graves sur la survie de l'organisme lorsqu'elle est massive.

Le sang est mis en circulation par une pompe : le **cœur**. Il s'agit d'un organe creux, qui met en mouvement le sang par une alternance de contractions (**systole**) et de relâchements (**diastole**). Le système circulatoire des mammifères est particulier, en ce que le cœur est une **double pompe** :

- La partie droite du cœur propulse le sang pauvre en O<sub>2</sub> dans la circulation pulmonaire, via l'artère pulmonaire, et le sang oxygéné rejoint le cœur via la veine pulmonaire.
- La partie gauche du cœur, dont la cavité a le même volume que celle du cœur droit, mais une **paroi** beaucoup plus épaisse, propulse le sang oxygéné dans l'ensemble des organes à l'exception du poumon. C'est l'**aorte**, la plus grosse artère de l'organisme, qui quitte le cœur gauche, et le sang pauvre en O<sub>2</sub> rejoint le cœur via les deux veines caves (supérieure et inférieure).

Les artères sont des vaisseaux sanguins à paroi épaisse ; cette paroi est élastique, et les petites artères et artérioles possèdent en plus une motricité importante, qui leur permet de moduler leur diamètre. Cette modulation du diamètre des artérioles permet d'irriguer plus ou moins telle ou telle partie de l'organisme selon les besoins (par exemple, irrigation forte du muscle pendant un effort physique). Les veines sont peu élastiques, ont un diamètre bien plus important que celui des artères, et n'ont quasiment pas de motricité. Elles constituent 70 % du volume du réseau vasculaire, et constituent un réservoir de volume. Les détails anatomiques et physiologiques concernant le système circulatoire seront vus en BCPST2.

Comment le sang peut-il transporter les gaz respiratoires que sont le dioxygène et le dioxyde de carbone ? Les gaz ont une certaine solubilité dans l'eau. Cependant, cette solubilité est d'autant plus grande que la température est faible. La température corporelle d'une vache est de 38°C ; à cette température, la solubilité

des gaz respiratoires est bien trop faible pour que le sang transporte en solution dans le plasma le dioxygène dont à besoin la vache pour son métabolisme respiratoire. C'est une protéine contenue dans l'hématie (**l'hémoglobine**) qui joue ce rôle. L'hématie est une **cellule énucléée** (qui a perdu son noyau au cours de sa différenciation) ; elle a également perdu l'ensemble de ses organites (mitochondries, vésicules, réticulum endoplasmique...). La totalité du volume du cytoplasme est occupé par une solution très concentrée d'hémoglobine. Cette protéine soluble est un hétérotétramère, c'est-à-dire qu'elle est constituée de 4 sous-unités différentes. Plus précisément, elle est constituée de deux sous-unités  $\alpha$  et deux sous-unités  $\beta$  (on écrit parfois  $\alpha_2\beta_2$ ) liées entre elles par des liaisons faibles (liaisons hydrogènes, liaisons de Van der Waals). Chaque sous-unité peut se lier à une molécule de dioxygène, si bien que chaque hémoglobine transporte **quatre molécules de dioxygène**. La fixation du dioxygène à l'hémoglobine est permise par une structure appelée **hème**, qui est un élément non protéique faisant partie de l'hémoglobine. Le hème comporte en particulier un atome de fer  $Fe^{2+}$  qui est responsable de la fixation du dioxygène, mais également de la couleur rouge de l'hémoglobine, et donc du sang.

L'hémoglobine étant une protéine très importante pour le transport des gaz respiratoires pour les mammifères, tout dysfonctionnement de l'hémoglobine (à cause, par exemple, d'une mutation génétique sur l'un des deux gènes de la globine  $\alpha$  ou de la globine  $\beta$ ) peut avoir des conséquences importantes. On pourra citer des maladies génétiques telles que la **drépanocytose**, ou anémie falciforme, et les **thalassémies**. Dans le cas de la drépanocytose, une mutation du gène de la globine  $\alpha$  provoque la **polymérisation de l'hémoglobine**, qui prend la forme de fibres. En plus du mauvais transport des gaz respiratoires, les hématies sont déformées et bouchent les vaisseaux sanguins. Les thalassémies consistent en l'absence de production d'une des deux globines  $\alpha$  ou  $\beta$ . Dans les formes graves, et sans traitement, le pronostic vital est engagé, et les patients dépassent rarement l'âge de 20 ans en raison de l'anémie sévère qui affecte la totalité des organes.

b) Le système porte permet le métabolisme des nutriments par le foie

Dans la majeure partie du système circulatoire, les artères se ramifient en artérioles puis en capillaires, de façon à alimenter les organes. Les capillaires fusionnent ensuite pour donner des veinules, qui fusionnent pour donner les veines. Dans certains rares cas, cependant, les veines se ramifient à nouveau en un réseau de veinules et de capillaires. Un exemple important de cette double ramification s'observe au niveau du **système porte** des mammifères :

- L'artère mésentérique, ainsi que quelques autres petites artères, se ramifient et irriguent le tube digestif.
- Les capillaires fusionnent en veinules pour former la **veine porte hépatique**.
- Cette veine **se ramifie à nouveau** et irrigue le **foie**, qui reçoit également du sang oxygéné par l'artère hépatique.

Quel est l'intérêt de cette double ramification ? La veine porte, qui provient directement du tube digestif, transporte de nombreux nutriments, mais également, éventuellement, des toxines qui auraient été absorbées par l'organisme via le tube digestif. Le foie est un organe responsable, entre autres, du stockage des nutriments, et de la métabolisation (donc la destruction) des toxines. Le fait que le tout premier organe à recevoir les nutriments et toxines lui permet d'exercer un contrôle immédiat :

- Les nutriments (glucides, mais également les acides aminés) sont absorbés par le foie et stockés ou transformés, ce qui évite une trop forte augmentation de la concentration sanguine en ces nutriments après un repas. Pour les glucides, c'est le glucose en particulier qui est absorbé et polymérisé par le foie sous forme d'un polymère : le glycogène.
- Les toxines éventuellement présentes sont absorbées par le foie, si bien que leur concentration dans la circulation générale est relativement basse. Ce système protège donc l'organisme de ces substances. On pourra citer l'exemple d'une neurotoxine très dangereuse : l'éthanol (alcool). Le foie détoxifie l'éthanol en l'oxydant en acétate, grâce à l'alcool-déshydrogénase, une enzyme abondante dans les hépatocytes (cellules du foie). L'acétate servira par la suite à fabriquer des graisses. C'est la raison pour laquelle un dysfonctionnement du foie (comme une hépatite par exemple) a pour conséquence une très forte intolérance à l'alcool, si bien qu'une quantité d'alcool normalement inoffensive peut conduire à un fort état d'ébriété, voire un coma éthylique.

### c) Transport et absorption des lipides

La problématique du transport des lipides est importante, dans la mesure où ces molécules sont **hydrophobes**, et ne peuvent donc par définition pas être transportées telles quelles par le sang. Les lipides les plus courants sont les **triglycérides**, qui sont des ester entre un triol, le glycérol, et trois acides gras. On rencontre également le cholestérol, qui est lipide amphiphile (il est essentiellement hydrophobe, mais possède un groupement hydroxyle hydrophile). Les lipides sont transportés sous la forme d'un agrégat de milliers de molécules appelé **lipoprotéines**.

Une lipoprotéine est une particule sphérique de quelques dizaines à centaines de nanomètres de diamètres, constituée de plusieurs composants :

- Les **apolipoprotéines** sont des protéines amphiphiles. La partie hydrophobe de l'apolipoprotéine est dirigée vers l'intérieur. La partie hydrophile est en contact avec son environnement, c'est-à-dire avec le plasma sanguin, riche en eau.
- Les **lipides hydrophobes** : ils sont situés à l'intérieur de la lipoprotéine, et ne sont pas en contact avec le plasma. C'est en particulier le cas des triglycérides.
- Les **lipides amphiphiles** : c'est le cas du cholestérol, mais également des phospholipides (voir ch. B2). Comme les apolipoprotéines, leur partie hydrophobe est dirigée vers l'intérieur et leur partie hydrophile est en contact avec le plasma.

Les lipoprotéines de plus grande taille sont les **chylomicrons**. Ils sont synthétisés dans le **réticulum endoplasmique lisse** des entérocytes, et prennent en charge la majeure partie des lipides absorbés par l'intestin. Ils sont libérés non pas dans le sang, mais dans la **lymphe**, qui circule dans les **vaisseaux lymphatiques**. Il s'agit d'un liquide à rôles nombreux ; il est alimenté par l'eau interstitielle qui quitte le sang au niveau des capillaires, dont il contribue au drainage. La lymphe est transportée de façon passive, et l'ensemble du réseau lymphatique se jette dans la circulation sanguine en un point unique, au niveau de la veine sous-clavière gauche.

Les chylomicrons sont ensuite absorbés par divers organes, dont le foie, qui libère ensuite, et selon les besoins de l'organisme et l'abondance en graisse, diverses lipoprotéines, dont le détail sera vu dans le chapitre B2.

Les lipoprotéines (dont les chylomicrons) sont absorbés par le foie par le processus d'**endocytose**. C'est un mode d'entrée dans la cellule privilégié pour les particules trop grosses pour passer à travers la membrane, comme c'est le cas des lipoprotéines. Il existe plusieurs modalités différentes d'endocytose. On va voir ici l'endocytose récepteur-dépendante.

Il existe à la surface des hépatocytes des **récepteur à lipoprotéines**, qui sont des **protéines transmembranaires**. Une lipoprotéine peut se fixer sur son récepteur par des **liaisons faibles** (liaisons de Van der Waals, liaisons hydrogène, liaisons ioniques...), ce qui provoque un **changement de la conformation du récepteur**. Ce changement de conformation provoque, du côté intracellulaire, une augmentation de l'affinité du récepteur pour une protéine du cytosol : l'**adaptine** ; celle-ci vient se fixer sur le récepteur, du côté intracellulaire. On dit que le récepteur **recrute** l'adaptine. Par la suite, l'adaptine recrute une protéine appelée **clathrine**, qui provoque une **déformation de la membrane vers l'intérieur**, jusqu'à créer une **vésicule** qui s'individualise de la membrane plasmique : les lipoprotéines ont alors été totalement internalisées.

Les phénomènes d'endocytose sont observés chez tous les Eucaryotes, y compris Champignons et plantes, et ont des rôles extrêmement variés. L'**endocytose à récepteur clathrine-dépendante** n'est qu'un des nombreux types d'endocytose.

## 4. L'excrétion élimine les déchets non gazeux du métabolisme

Le métabolisme est à l'origine de nombreux déchets, et en particulier un déchet carboné (le CO<sub>2</sub>) et des

déchets azotés, issus notamment de la dégradation des acides aminés. La libération de déchets azotés est observée chez tous les animaux, qui sont hétérotrophes pour l'azote, et ne peuvent donc pas réutiliser l'azote minéral. Selon les espèces, ces déchets peuvent être de nature diverse :

- Chez les organismes aquatiques (la plupart des poissons, les crustacés...), c'est l'ammoniaque ( $\text{NH}_4^+$ ) qui est libéré.
- Chez les oiseaux, c'est l'acide ornithurique.
- Chez les mammifères, c'est l'**urée**, une molécule comportant un carbone et deux azotes.

C'est le **rein** qui est responsable de l'élimination de l'urée. Il permet, grâce à un mode de filtration très efficace, de débarrasser l'organisme de nombreux autres déchets et/ou toxine qui auraient pu entrer dans l'organisme. Le rein est un organe pair. Chez la vache, chaque rein est composé de plusieurs lobes. Il reçoit le sang depuis l'artère rénale ; les reins comptent pour environ 0,5 % du poids de l'individu, mais ils reçoivent 20 % à 30 % du débit sanguin, ce qui est considérable.

La structure élémentaire à l'origine de la fonction de filtration du rein est le **néphron**. Chaque rein comporte des millions de néphrons. La filtration s'opère en deux étapes : ultrafiltration et réabsorption. Les explications seront opportunément accompagnées du schéma du document 16.

Au niveau du glomérule, une grande partie de la fraction liquide du sang **quitte les capillaires**, et rejoint le corpuscule rénal, qui est le début du tube du néphron. Le sang qui quitte le glomérule contient donc encore toutes ses cellules, mais également ses protéines. En revanche, il est très appauvri en eau, en glucides, en acides aminés, mais également en **déchets et toxines**. Les artères provenant du glomérule se ramifient ensuite, et **suivent l'anse du néphron**, où circule l'**urine primaire**, riche en déchets, toxines et nutriment. L'épithélium du tube du néphron va alors réabsorber activement et sélectivement les sels minéraux et les nutriments, concentrant ainsi les déchets et toxines dans l'urine.

Cette façon de former l'urine peut paraître déroutante : lorsqu'on débarrasse une vieille maison et qu'on trie ce que l'on jette, on sélectionne les déchets, et on ne touche pas à ce que l'on garde. Le rein pratique l'inverse : il commence par tout jeter, puis sélectionne ce qu'il garde et le récupère. Ce mécanisme a pour avantage important que la totalité des déchets est forcément éliminée.

Comment se fait la réabsorption des nutriments ? De même que dans l'intestin grêle et la panse, les nutriments sont absorbés par des transporteurs actifs primaires et/ou secondaires, la réabsorption des nutriments dans le tube du néphron a lieu par des transports actifs. En particulier, pour le glucose, c'est un transporteur **SGLT** qui permet la réabsorption. **SGLT1** est le transporteur typique de l'**intestin grêle**, quand **SGLT2** est le transporteur spécifique du **rein**.

Conclusion du I. : comme on l'a vu, **l'organisme animal échange de la matière avec son environnement** : il prélève de la matière organique, de l'eau et du dioxygène, il rejette du  $\text{CO}_2$  et des déchets métaboliques azotés. La matière organique permet à l'animal, via la respiration, de se fournir en **énergie**. L'organisme animal prélève donc également de l'énergie dans son environnement. Pour ces raisons, on dit que l'organisme animal est un **système thermodynamique ouvert** ; il échange de la **matière** et de l'**énergie** avec son environnement. Les fonctions de nutrition traduisent cet état.

## **II. La fonction de reproduction**

La **reproduction** consiste en la création d'un nouvel individu à partir d'un ou plusieurs individu(s) parent(s). Chez les mammifères, la reproduction est **sexuée** : elle consiste en une méiose, à l'origine de gamètes, qui fusionnent lors de la fécondation et forment une cellule œuf, qui se développe et donne un nouvel individu. Chez les mammifères, les sexes sont séparés (c'est-à-dire qu'il y a des individus femelles et de individus mâles). La *vache* désigne aussi bien l'individu femelle que l'espèce *Bos taurus*, en particulier parce que la majeure partie des individus exploités par l'homme sont des femelles ; le mâle s'appelle le **taureau**.

La reproduction conserve les **caractères de l'espèce** :

- Le **caryotype** (ensemble des chromosomes) est conservé.
- Les **gènes** sont conservés (mais **pas** les allèles).
- Le **plan d'organisation** est conservé.

La vache a entre 20 000 et 25 000 gènes, et pour chaque gène, plusieurs dizaines d'allèles existent. Ces allèles sont **brassés** lors de la méiose et la fécondation (brassages inter- et intrachromosomiques). Ces brassages sont à l'origine d'une **diversification de la descendance**.

## 1. Développement embryonnaire et post-embryonnaire

### a) La vache est vivipare

Chez la vache, la totalité du développement embryonnaire a lieu dans les voies génitales de la femelle. Elle donne naissance à un petit – le veau – qui est nu. On dit qu'elle est **vivipare** (contrairement aux oiseaux par exemple, qui pondent des œufs, et sont donc ovipares). La fécondation (c'est-à-dire la fusion des gamètes) est également interne, comme beaucoup d'animaux terrestres.

L'anatomie des organes reproducteurs est très proche de celle des autres mammifères, comme la souris ou l'humain. Elle doit être connue.

Après saillie (accouplement), le mâle dépose dans le vagin les spermatozoïdes. La fécondation a lieu dans l'oviducte, et le zygote (cellule œuf) débute alors le **développement embryonnaire**. L'embryon va alors s'implanter dans la muqueuse utérine (l'endomètre) lors de la **nidation**. Se développe alors une structure mixte (embryonnaire et fœtale) permettant les échanges entre l'embryon et la mère : le **placenta**. Le placenta a une structure variable selon les mammifères. Chez les vaches, il est dit **cotylédonaire**. Il est constitué par quelques dizaines de boules responsables des échanges entre le sang de la mère et le sang du fœtus, la mère fournissant les nutriments et récupérant les déchets. Chacune de ces boules est constituée d'une partie foetale (le **cotylédon**) et une partie maternelle (le **caroncule**). Ces deux structures sont très irriguées, et leur interface a une très grande surface, qui permet de maximiser les échanges ; le lien surface/flux est expliqué par la **loi de Fick**.

### b) Des hormones contrôlent la reproduction

Une **hormone** est une molécule (qui peut être de nature chimique variable) qui a un rôle de **signalisation** à l'intérieur de l'organisme. Elle est **produite** par un ou plusieurs organe(s), sont **transportées par voie sanguine**, et sont **reçues par des cellules cibles** disposant des récepteurs adéquats. Certaines hormones, dites hormones sexuelles, sont produites par les gonades, et directement impliquées dans le fonctionnement de l'appareil. Il s'agit principalement de :

- La testostérone pour le mâle.
- L'oestradiol et la progestérones pour la femelles.

Chacune de ces deux hormones est lipidique, et dérivée du **cholestérol**. Etant hydrophobes, elles ne peuvent pas être transportées telles quelles dans le sang, et sont prises en charge par une protéine, appelée **sex hormone binding globulin**, ce qui peut se traduire par *globuline qui se lie à l'hormone sexuelle*.

La production d'hormones sexuelles par les gonades est sous le contrôle de deux hormones de nature protéique et produites par l'**hypophyse** (une glande située dans le cerveau) : la LH (*lutinizing hormone*) et la FSH (*folliculostimulating hormone*). Leur production est elle même contrôlée par une production pulsatile de GnRH (*gonadotropin-releasing hormone*) par l'**hypothalamus**.

Chez la vache femelle, comme chez la femme, le taux sanguin de LH, de FSH, d'oestradiol et de progestérone suit un cycle dont la durée est fixe et indépendante des saisons (chez beaucoup de mammifères, le cycle est saisonnier). Un cycle complet dure environ 20 jours chez la vache. Il est composé de deux phases inégales :

- Durant la **phase folliculaire**, qui dure environ 4 jours, le taux d'oestradiol est élevé, ce qui stimule le

développement des follicules, les structures ovariennes contenant les ovocytes. L'ovulation a lieu à la fin de cette phase folliculaire. Pendant environ 24 h avant l'ovulation, la vache adopte un comportement réceptif à l'accouplement (appelé **oestrus**) ; en cas d'accouplement, il a de grandes chances de provoquer une fécondation, et donc une gestation.

- Durant la **phase lutéale**, le follicule ayant libéré l'ovocyte se différencie en **corps jaune**, qui produit de la progestérone. Cette progestérone provoque une augmentation de l'épaisseur de l'endomètre, qui devient réceptif à la nidation. Le corps jaune dégénère à la fin de la phase lutéale s'il n'y a pas fécondation, mais se maintient pendant une grande partie de la gestation. La production de progestérone pendant la gestation permet le non-rejet de l'embryon et stimule le développement du placenta.

En fin de gestation, le taux sanguin de prolactine – une hormone hypophysaire – augmente chez la vache, ce qui stimule la production de lait par les glandes mammaires, mais provoque également les premières contractions à l'origine de la **parturition**.

La **parturition** désigne (y compris chez l'humain) l'expulsion du petit. Selon les espèces, il peut recevoir des noms spécifiques. Chez l'humain, on parlera d'accouchement ; chez la vache, on parlera de **vêlage** (de *vitulus*, le veau). La gestation de la vache dure environ 290 jours (9 mois et demi) chez la vache.

Chez le taureau, le taux de testostérone est constant tout au long de l'année, et provoque une production continue de spermatozoïdes. Il est apte à se reproduire à tout moment de l'année, mais n'adopte un comportement de reproduction que lorsque qu'une femelle est en oestrus.

#### c) La vache allaite ses petits

Dès sa naissance, le petit est nourri par sa mère grâce à la production du **lait**. Il s'agit d'un liquide blanc opaque dont la composition est la suivante :

- Il est riche en eau et sels minéraux
- Il est riche en protéines (notamment en **caséine**), qui permettent la nutrition azotée du petit et lui permettent d'augmenter rapidement sa masse musculaire.
- Il est riche en **lipides**, qui sont présents sous forme de gouttelettes de graisse en équilibre relatif. Ces lipides peuvent être séparés partiellement de la phase aqueuse, pour former la **crème**, ou totalement, pour former le **beurre**. Les lipides permettent au veau d'assurer sa nutrition carbonée.
- Il est riche en glucides, et notamment en **lactose**. Ce sucre est constitué d'un dimère de glucose et de galactose, qui est un autre glucide à 6 carbones, de formule très légèrement différente du glucose. Le lactose permet, comme les lipides, d'assurer la nutrition carbonée du veau.

Juste après la naissance, et pendant quelques jours, le lait a une composition particulière ; il est alors appelé **colostrum**. Le colostrum est plus pauvre en glucides que le lait, mais il est extrêmement riche en **lipides** et en **protéines**. Il permet un apport énergétique majeur du veau, ce qui lui permet en particulier d'assurer sa thermorégulation, qui est une contrainte importante pour le nouveau-né qui était jusqu'alors maintenu à une température élevée par sa présence dans l'utérus. Parmi les protéines, on note la présence d'immunoglobulines (ou anticorps), qui sont directement absorbées par la paroi de l'estomac (le veau ne dispose que d'un estomac, la caillette). Ces immunoglobulines assurent les défenses immunitaires du veau qui ne dispose pas encore d'un système immunitaire mature, et surtout, qui est naïf pour la totalité des infections potentielles, n'ayant jamais été en contact avec des pathogènes.

La lactation d'une vache débute au moment de la parturition et la production augmente jusqu'à un pic de production, qui a lieu autour de 50 jours après vêlage. La production diminue alors linéairement, et atteint au bout de 250 à 300 jours environ 30 % seulement de la valeur maximale. Ensuite, la production s'effondre (c'est le **tarissement**). Afin d'assurer une production de lait sur plusieurs années, il est important de provoquer une nouvelle gestation dès que possible. Il existe un intervalle temporel incompressible, dit **intervalle vêlage-fécondation**, en dessous duquel une nouvelle fécondation est impossible ; il est d'environ 80 jours. Cela signifie donc qu'une nouvelle fécondation ne pourra avoir lieu, au plus tôt, que 80 jours après la naissance du veau. La nouvelle gestation consomme des réserves et de la nourriture, et diminue donc la



production de lait ; mais elle est indispensable à la prolongation dans le temps de la lactation.

Ces modalités de lactation ont plusieurs conséquences :

- Entre le tarissement (à 300 jours) et le nouveau vêlage (à 370 jours), il existe un temps incompressible pendant lequel la vache ne produit pas de lait.
- La production d'un individu est très irrégulière ; une production régulière de lait dans une exploitation nécessite donc un grand nombre d'individus, et nécessite de décaler les naissances des veaux, de façon à compenser les périodes de tarissement de certaines individus par des périodes de pic de production pour d'autres individus.
- Tout échec dans la fécondation entraîne un retard de 20 jours (la durée d'un cycle hormonal) sur le vêlage, et donc sur la production de lait, qui peut être dommageable pour la régularité de la production de lait de l'exploitation.

La production de lait constitue une dépense énergétique extrêmement importante pour la vache, qui peut produire plus de trente litres de lait par jour au moment du pic de reproduction. La nutrition de la vache doit être optimisée de façon à ce que son apport en nutriments soit suffisant pour compenser (ou du moins, ne pas être trop déficitaire) la consommation due à la production de lait. Dans les mois qui suivent le vêlage, l'alimentation ne compense pas la production de lait, et il faut veiller à ce que **l'amaigrissement** ne soit pas excessif. Entre 3 et 4 mois après le vêlage, la diminution de la production de lait, entre autre, permet la **reprise d'état**, c'est-à-dire une reprise de l'engraissement, qui permet de préparer un nouveau vêlage et une nouvelle lactation. Il faut alors surveiller que l'engraissement n'est pas excessif. La **note d'état corporel** est un indicateur utilisé par les agriculteurs, et standardisé pour chaque race de vache, permettant d'évaluer l'état d'amaigrissement ou d'engraissement d'une vache.

La production de lait a lieu dans les **glandes mammaires**, que l'on rencontre chez tous les mammifères. L'unité fonctionnelle de la glande mammaire est l'**acinus mammaire**. Un **acinus** (pluriel : des acini) est une structure sécrétrice borgne ; on en trouve dans de nombreux organes glandulaires, comme par exemple le pancréas exocrine. Ce sont les cellules épithéliales glandulaires qui produisent le lait. On appelle **lactation** la production de lait par les glandes mammaires.

Dans le lait, certaines molécules sont de petite taille (eau, lactose, ions minéraux) et sont libérées par des transporteurs actifs ou passifs, donc par des échanges transmembranaires. D'autres molécules en revanche sont de taille plus importante (lipides, protéines, comme la caséine) et ne peuvent traverser la membrane. Ces molécules sont libérées par un processus appelé **exocytose**. L'exocytose consiste en la fusion d'une vésicule (petit organite sphérique, entouré d'une membrane) avec la membrane plasmique. Le contenu de la vésicule est alors libéré dans le milieu extérieur. L'exocytose est permise par des protéines de la famille SNARE situées dans les membranes :

- v-SNARE est une protéine de la membrane de la vésicule
- t-SNARE est une protéine de la membrane plasmique

L'interaction de v-SNARE et t-SNARE, en particulier permis par un fort taux de  $Ca^{2+}$ , provoque le rapprochement de la vésicule de la membrane plasmique, et donc la fusion des membranes. Si la vésicule contient de la caséine (par exemple), celle-ci est libérée dans la lumière de l'acinus.

On va ici découvrir quelques expériences qui montrent comment le lait est produit, mais également comment il est expulsé des glandes mammaires.

Dans le document 23 gauche, on mesure la pression intramammaire après massage du trayon d'une vache. On constate que cette pression augmente très rapidement, quelques secondes seulement après massage, pour atteindre une valeur maximale (deux fois la valeur initiale) moins d'une minute après le massage. La pression intramammaire décroît ensuite jusqu'à retourner à la valeur initiale en 10 minutes environ. Cette augmentation de la pression intramammaire peut sans doute provoquer une **expulsion du lait**. On déduit donc de cette expérience que :

- L'expulsion du lait est **active**.
- Elle est **provoquée** par le massage du trayon, ce qui dans la nature est réalisé par la **tétée** par le veau.

On cherche par la suite à comprendre quels sont les mécanismes physiologiques qui expliquent cette réaction de la glande mammaire à la tétée. Dans le document 23 droite, on injecte de l'ocytocine (une hormone hypophysaire) dans le sang d'une vache. On constate une réponse très proche de celle observée dans la première expérience (forte augmentation de la pression intramammaire, diminution régulière sur une durée d'une dizaine de minutes). On déduit donc que l'ocytocine provoque une augmentation de la pression intramammaire, probablement à l'origine d'une éjection du lait. On peut **faire l'hypothèse** que l'augmentation de la pression intramammaire provoquée par le massage du trayon (et donc par la tétée) est due à une augmentation de la concentration sanguine en ocytocine ; cela reste cependant une hypothèse. Enfin (document 24), on a mesuré le taux d'ocytocine dans le sang d'une vache après massage du trayon. On constate que ce taux augmente en réponse au massage. Donc, c'est bien la tétée qui provoque l'augmentation du taux sanguin d'ocytocine, et l'ocytocine libérée provoque l'éjection active du lait.

On peut montrer que le massage du trayon provoque, par voie nerveuse, une stimulation de l'hypothalamus, qui en réponse stimule l'hypophyse, par voie nerveuse également. L'hypophyse, en réponse, sécrète dans le sang de l'ocytocine, qui provoque la stimulation des cellules myoépithéliales.

Comment est entretenue la production de lait ? On a réalisé chez la femme une mesure du taux de prolactine, une hormone hypophysaire déjà rencontrée, durant la période de lactation (document 25). On mesure en parallèle la fréquence de la tétée. On constate que la fréquence de tétée et le taux de prolactine évoluent dans le même sens ; on dit que ces deux grandeurs sont corrélées. Une corrélation doit être interprétée avec beaucoup de précautions : si A et B sont corrélées, alors A peut influencer sur B, ou B peut influencer sur A, ou C peut influencer sur A et B. Ici, il n'est pas possible d'envisager que le taux de prolactine influe sur la fréquence des tétées, car celle-ci est déterminée par le bébé et non par la mère. On peut en revanche proposer que la tétée influe sur la prolactine, en stimulant la production de prolactine par la mère. On peut montrer que cette hypothèse est la bonne (même si les données de ce seul document sont insuffisantes pour arriver à cette conclusion), et que la tétée provoque, par voie nerveuse, une stimulation de l'hypothalamus, qui en réponse stimule l'hypophyse – via le peptide vasointestinal, VIP –, ce qui provoque la sécrétion de prolactine, qui entretient la lactation au niveau de l'épithélium des glandes mammaires.

Une des caractéristiques importantes de la reproduction des mammifères est le temps passé à élever les jeunes, qui va de pair avec la lactation. Ce temps permet notamment la transmission culturelle (qui n'est pas l'apanage des humains, loin s'en faut).

## 2. Sélection naturelle et artificielle

### a) Notion de sélection

La sélection consiste en l'élimination d'individus portant des caractères désavantageux et la préservation d'individus portant des caractères avantageux. La notion de caractère avantageux ou désavantageux est assez claire pour les espèces qui ne sont pas domestiquées : un caractère avantageux est un caractère qui favorise la survie et/ou la fécondité. Le produit de la survie par la fécondité – qui sont deux grandeurs qui sont mesurables – est appelé **valeur sélective**. La valeur sélective dépend tout particulièrement de l'environnement dans lequel vit l'individu ou l'espèce ; la forte valeur sélective d'un individu dans un milieu donné traduit le fait qu'il est **adapté à son milieu**. Des fluctuations du milieu (changement de climat, introduction d'un nouveau prédateur) ou des changements de génotypes (par croisements avec des individus de génotypes différents ou apparition de mutations) peuvent modifier la valeur sélective.

- Dans ce cas, l'individu pourra être **plus adapté à son milieu**, et sa valeur sélective augmentera alors. **Il transmettra donc mieux que les autres individus** moins adaptés ses allèles, dont la fréquence aura tendance à augmenter dans la population.
- Dans le cas contraire, l'individu sera **moins adapté à son milieu**, et sa valeur sélective diminuera. **Il transmettra donc moins bien que les autres individus** mieux adaptés ses allèles, dont la fréquence aura tendance à diminuer dans la population.

Le concept que l'on vient de développer est appelé **sélection naturelle**, et est observé exclusivement chez les espèces vivant en dehors de la domestication par l'homme.

Chez les espèces dont la reproduction est contrôlée par l'homme (dont la quasi-totalité des espèces animales élevées), la notion de caractère avantageux ou désavantageux est bien plus subjective. Elle dépend du désir de l'agriculteur. Ainsi, chez la vache, une forte production de lait peut être considérée comme **avantageuse** pour un éleveur qui cherche à vivre de la fabrication de fromage, mais sera une perte de matière et donc **désavantageuse** pour celui qui cherche à maximiser l'allocation de l'énergie dans la production de viande.

Les caractères non neutres (c'est-à-dire qui apportent un avantage ou un désavantage, qu'il soit absolu dans le cas de la sélection naturelle ou subjectif dans le cas de la sélection artificielle) sont toujours potentiellement soumis à sélection. En revanche, cette sélection ne peut avoir une conséquence sur la descendance que dans l'hypothèse où les caractères sélectionnés sont **codés génétiquement**. La conséquence en est l'**évolution des espèces par voie de sélection** (notamment naturelle), concept élaboré initialement par Charles Darwin et Alfred Russel Wallace au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle.

b) Les races actuelles sont issue d'une sélection artificielle

Le concept de **race** est essentiel pour toutes les espèces animales domestiquées. C'est le nom donné à une **sous-espèce issue d'une sélection artificielle** et dont les caractéristiques sont **stables** d'une génération à l'autre. La stabilité des caractères est permise par un **degré d'homozygotie** élevé pour de nombreux gènes, permis par une reproduction entre individus partageant des caractéristiques communes (et partageant donc des allèles identiques). La diversité génétique est donc faible au sein d'une race. Ce concept existe chez les végétaux également, mais pour des raisons historiques, on parlera de variété et non de race.

Le terme *race* a été employé par le passé pour décrire les différences morphologiques entre les populations humaines, et en particulier la couleur de la peau. Toutefois :

- Les populations humaines actuelles ne sont pas la conséquence d'une sélection artificielle, mais d'une sélection naturelle : les variations observées entre populations sont donc la conséquence du hasard et de l'adaptation au milieu, et non de la volonté de standardisation d'un sélectionneur. Elles ne remplissent donc absolument pas les conditions pour être qualifiées de *races*.
- Les caractéristiques facilement observables (comme la couleur de peau) ne reflètent qu'une infime partie de la diversité génétique existant au sein de l'espèce humaine, et la variabilité génétique existant **au sein** des prétendues *races* humaines est la plupart du temps bien plus grande que la variation génétique **entre** ces prétendues *races*. On notera à titre d'exemple que la diversité génétique humaine est largement supérieure en Afrique sub-saharienne à celle que l'on observe dans toutes les autres populations humaines, bien que ces populations soient considérées par certains comme *de race noire*.
- Au delà des aspects purement scientifiques, qui rendent la notion de race humaine complètement aberrante, le *racisme* est une idéologie politique qui, selon les époques, exploite et détourne la biologie (comme cela a pu être le cas jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle) ou la sociologie et la culture (plus courant au XXI<sup>e</sup> siècle) pour justifier une différence de traitement entre individus appartenant à des supposées *races* différentes.

Chez la vache, diverses caractéristiques ont été ou sont sélectionnées par les éleveurs, de façon plus ou moins empirique selon les époques, de façon à produire des individus aux caractéristiques désirées. Les deux principaux caractères sélectionnés sont la production de lait et la production de viande, mais la rusticité (résistance aux basses températures) peut également être un critère de sélection important (dans les régions de montagne par exemple).

Les **races à viande** ou **races bouchères** ont été sélectionnées pour leur masse musculaire importante et éventuellement leurs qualités gustatives (taux de gras, tendreté, goût...). Elles ont un aspect massif, dû à la masse musculaire importante. Les mâles sont souvent particulièrement imposants et impressionnants. En France métropolitaine, on citera :

- La **charolaise**, originaire de Bourgogne. Elle a une robe blanc-crème, et pèse autour de 800 kg pour une femelle, ce qui en fait une race massive. Avec autour de 2 millions d'individus en France, c'est la première race bouchère française.
- La **limousine**, originaire de l'Ouest du massif central. Elle a une robe marron clair, et pèse autour de

750 kg pour une femelle. Avec 1 million d'individus en France, c'est la 2<sup>nd</sup>e race bouchère française après la charolaise.

- La **blanc bleu belge**, originaire de Belgique. Son nom est dû à des taches pigmentées de la peau associé à un pelage blanc ras, qui donne une couleur bleutée. On a montré que les individus de cette race possédaient une mutation perte-de-fonction du gène de la myostatine, un gène qui contrôle le développement des muscles. Cette mutation cause un développement excessif des muscles. Ce développement musculaire poussé à l'extrême cause des problèmes lors du vêlage, si bien que les césariennes sont la plupart du temps nécessaires. Son poids est d'environ 800 kg pour une femelle, mais son rendement d'abattage (soit le rapport entre le poids de viande récupéré et le poids de la carcasse) est le plus élevé de toutes les races, puisqu'il peut atteindre 70 % (contre 55 à 65 % pour les charolaises et limousines).

Les **rac**es **l**aitières ont été sélectionnées pour la quantité et/ou la qualité de lait qu'elles produisent. En particulier, le taux butyreux du lait (ou taux de graisse) et le taux protéique sont des critères de sélection qui peuvent être recherchés dans le cadre de la fabrication de certains fromages ou produits de transformation du lait (crème, beurre). Également, elles ont été sélectionnées sur le critère de la faible agressivité vis-à-vis de l'homme, notamment lors du retrait précoce du veau (les mères de races bouchères peuvent se montrer très agressives si l'on tente de leur retirer leur veau). Deux races sont très courantes en France :

- La **prim'Holstein**, dérivée de la Holstein des Pays-Bas, et sélectionnée à la fin du XX<sup>e</sup> siècle en France, est la vache laitière par excellence. Elle a une robe pie noire (c'est-à-dire blanche à taches noires). Elle a une masse musculaire faible, ce qui lui donne parfois une morphologie rachitique, à l'opposé des races bouchères. Ses glandes mammaires sont particulièrement imposantes, et elle produit en moyenne 25 L de lait par jour (certains individus peuvent produire jusqu'à 37 L de lait par jour). Sa production importante en fait une race de choix dans la production laitière industrielle (lait stérilisé, yaourts et fromages industriels), où elle représente 80 % du lait. Elle représente 70 % de tout l'élevage laitier français. Sa stabilisation raciale récente et les qualités peu originales de son lait font qu'elle est exclue de la majeure partie des cahiers des charges des fromages AOC (appellation d'origine contrôlée), qui utilisent la plupart du temps des races locales.
- La **normande**, originaire de Basse-Normandie. Elle a une robe pie brune (les taches sont plus petites et plus irrégulières que la prim'Holstein) et des « lunettes » brunes. Avec ses forts taux butyreux et taux de protéines, elle est particulièrement adaptée à la fabrication de fromage de qualité. La plupart des fromages AOC normands utilisent cette race (camembert de Normandie, Livarot, Pont-l'Évêque...).

Quelques races sont **mixtes** : elles ont été sélectionnées de façon à produire un lait abondant et/ou de qualité tout en produisant une carcasse valorisable. Ce sont souvent des races de montagne. En France, on notera :

- La **salers**, originaire du Massif Central, et qui permet la production du Cantal et du Salers, deux fromages à pâte pressée non cuite. Elle est très rustique, grâce à ses poils longs, qui lui permettent de résister aux hivers rigoureux des hauts plateaux du Sud du Massif Central.
- L'**abondance**, originaire de Haute-Savoie, et qui permet la production du reblochon, de l'abondance et du beaufort. Elle est rustique et apte à la marche (grâce à son poids moyen, autour de 600 kg pour une femelle), ce qui lui permet d'accéder à des alpages de haute altitude.
- La **montbéliarde**, apparentée à l'abondance, et originaire du Jura, et qui permet la production du comté, du morbier, du bleu du Vercors... C'est la première race française pour les fromages AOC.

Il ressort de ces présentations des races que, en tant que productrice de matière consommable (lait, viande, mais également cuir), et façonnée par l'homme, la vache peut être considérée comme un **objet technologique**, ou **objet agronomique**. Elle peut être vue comme une usine fabriquée par l'homme (par sélection), qui transforme une matière première (l'herbe) en matière transformée (le lait ou la viande). Cette approche peut paraître choquante, mais reste une clé de lecture de la vache comme concept. Elle doit être comprise, mais ne doit pas pour autant occulter les autres clés de lecture : la vache est également un animal dont on peut chercher à comprendre le fonctionnement (approche physiologique), c'est un animal qui fait partie d'un écosystème (approche écologique), c'est un animal aux représentations nombreuses dans l'imaginaire collectif (approche culturelle), c'est un organisme sensible (approche humaniste voire non spéciste)... Chacune de ces approches est une façon non exclusive de comprendre et décrire le concept de

vache.

### **III. Les fonctions de relation**

Les fonctions de relation désignent l'ensemble des fonctions permettant l'interaction avec le milieu et la réaction de l'organisme à son milieu, à savoir :

- Les organes permettant de prélever des informations sensorielles et des les intégrer (système nerveux).
- Les organes permettant de réguler les paramètres internes.
- Les organes permettant la locomotion.
- Les organes assurant la protection de l'organisme contre les agressions extérieures.
- L'ensemble des interactions (non reproductrices) entre l'organisme et les autres individus, qu'ils soient ou non de la même espèce.

#### **1. L'organisme prélève et intègre des informations**

Divers paramètres du milieu externe peuvent être perçus par l'organisme. Les **sons**, qui sont des vibrations de l'air, peuvent être perçus par les organes responsables de l'ouïe. Chez les mammifères, l'oreille externe comporte un pavillon permettant de canaliser les sons vers le tympan, une membrane permettant la transmission des sons à l'oreille interne. L'oreille interne convertit les sons en un signal nerveux. L'ouïe des mammifères est capable de distinguer l'amplitude des sons, mais également leur fréquence (hauteur) ; ces aptitudes varient selon les espèces, et au sein de l'espèce, selon l'âge de l'individu.

La lumière est perçue par les **yeux**. Chez les vertébrés, les yeux se présentent sous la forme de sphères, qui permettent la focalisation de la lumière et l'accommodation, grâce à une lentille fixe (la cornée) et une lentille de vergence adaptable (le cristallin). La rétine, au fond de l'œil, est constituée de neurone particulier appelés photorécepteurs. Il existe deux types de photorécepteurs : les cônes, sensibles aux couleurs et activés dans les cas de fort éclaircissement, et les bâtonnets, insensibles aux couleurs et actifs seulement pour les faibles intensités lumineuses (ils sont importants pour la vision de nuit). La pupille permet de faire varier la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil, et protège la rétine en cas de forte intensité lumineuse. Le champ de vision correspond à la zone de l'espace qui peut être perçue par l'animal. Le champ de vision binoculaire correspond à la zone du champ de vision qui peut être perçue par les deux yeux à la fois. La vision d'une zone par les deux yeux permet au cerveau de construire une image tridimensionnelle de l'espace (avec une bonne appréciation des distances). On trouve une vision binoculaire efficace et couvrant un champ important chez les animaux prédateurs, chez qui l'appréciation des distances en profondeur est cruciale. Chez les proies, au contraire, une vision binoculaire n'est pas d'une grande utilité, mais la couverture même monoculaire d'un champ important permet de détecter des prédateurs, y compris lorsqu'ils attaquent par l'arrière. Chez la vache, les yeux sont situés sur les deux côtés droit et gauche de la tête, si bien que la quasi-totalité de l'espace peut être perçue (l'angle mort postérieur est d'environ 20°, soit 5 % seulement de l'espace), mais la vision binoculaire est mauvaise.

La peau est un organe sensoriel majeur. Elle permet d'avoir des sensations tactiles très diverses : une dizaine de types de capteurs existent, qui détectent la douleur, les pressions légères, les pressions fortes, les démangeaisons, la température... Les récepteur sont constitués par des cellules ou des groupes de cellules. Ils transmettent par voie nerveuse au cerveau les informations captées.

La langue et la muqueuse olfactive sont responsables de la perception chimique de l'environnement. Les papilles de la langues détectent certaines molécules solubles dans l'eau de la salive, et ont un rôle en particulier dans le choix de la nourriture. Le nombre de sensations différentes captées par la langue est cependant relativement faible. En revanche, la muqueuse olfactive peut détecter un très grand nombre de substances volatiles, notamment par les combinaisons de plusieurs dizaines de récepteurs différents. Cela fait de l'odorat une fonction essentielle chez de nombreux animaux. Chez la vache, l'odorat est un sens plus sollicité que l'ouïe ou la vue, notamment dans la communication entre individus.

Une fois que les organes des sens ont perçu les informations de l'environnement, ils les transmettent par voie nerveuse (dite afférente) au système nerveux central (moelle épinière et/ou encéphale). C'est dans le système nerveux central qu'a lieu l'intégration de ces signaux, qui conduit à la production d'une réponse à ces stimuli parfois contradictoires. L'hypothalamus et la moelle épinière sont en particulier responsables de la réponse autonome (ou réflexe). Le cortex cérébral est responsable d'une réponse volontaire. L'intégration peut être facilement illustrée par la réponse d'un animal à deux stimuli contradictoires ; un cerf affamé, proche d'une source de nourriture et d'un loup perçoit deux stimuli contradictoires (la vue du prédateur qui devrait provoquer la fuite, et la vue de la nourriture qui devrait provoquer l'effet inverse). L'intégration consiste en la décision – inconsciente dans ce cas – de fuir le loup (et de risquer de mourir de faim) ou de consommer la nourriture (et de risquer de se faire attaquer par le loup).

## 2. Les paramètres internes sont régulés

En réponse aux fluctuations de l'environnement, les paramètres du milieu interne peuvent être amenés à varier. De nombreux paramètres sont pourtant constant au cours de la vie : ils sont donc régulés par l'animal. On va voir ici sur l'exemple de la température interne que l'animal, selon les conditions du milieu, peut contrôler la température de façon à ce qu'elle reste très proche de 38°C.

On appelle valeur de consigne la valeur moyenne et normale d'un paramètre interne régulé. Ici, pour la température, la valeur de consigne est de 38°C. Il peut arriver que la température soit supérieure à la température de consigne (en raison d'une canicule ou d'un effort physique intense par exemple) ; il peut également arriver que la température soit inférieure à la température de consigne (par exemple pendant une vague de froid ou pendant la traversée d'une rivière très froide). C'est dans ces cas que les boucles de thermorégulation s'enclenchent. Par ailleurs, on peut noter que le système nerveux périphérique comporte une partie appelée système nerveux autonome, divisée elle-même en système nerveux orthosympathique et parasympathique. Ces deux sous-systèmes permettent de réguler des processus non conscients comme des activités réflexes.

Si la température est **inférieure** à la température de consigne, elle est détectée par des thermorécepteurs situés dans l'**hypothalamus postérieur**. Il s'ensuit une activation du système orthosympathique, qui stimule (grâce à un neurotransmetteur appelé noradrénaline) la glande **médullo-surrénale**. Cette glande, située comme son nom l'indique juste au dessus du rein, sécrète une hormone : l'adrénaline. L'adrénaline a plusieurs fonctions :

- Elle augmente le **tonus musculaire**, ce qui produit de la chaleur.
- Elle stimule la **respiration cellulaire** dans les **adipocytes bruns**, qui produisent de la chaleur en oxydant les lipides.
- Elle provoque la contraction des **muscles horripilateurs**, des muscles situés à la base des poils, qui provoquent le hérissément des poils et augmentent la résistance thermique de la peau en augmentant la couche d'air – isolant – emprisonnée par les poils. Chez l'humain, cette réaction est appelée la « chair de poule, » et a perdu son rôle de thermorégulation en raison de la pilosité réduite dans l'espèce humaine.
- Elle provoque la **vasoconstriction** des artérioles de la peau, ce qui limite l'irrigation du derme, et donc la déperdition de chaleur par la peau. Chez les animaux ayant un pelage clairsemé et/ou la peau fine, la peau blanchit (d'où le teint blanc d'un humain qui a trop froid).

L'ensemble de ces réactions a pour conséquence une augmentation de la température, jusqu'à ce que l'organisme atteigne à nouveau la valeur de consigne de 38°C.

Si la température est **supérieure** à la température de consigne, elle est détectée par des thermorécepteurs situés dans l'**hypothalamus antérieur**. Il s'ensuit une activation du système orthosympathique, qui stimule (grâce à un neurotransmetteur appelé acétylcholine) deux organes :

- Elle provoque la **vasodilatation** des artérioles de la peau, ce qui provoque une irrigation forte de la peau, et donc une évacuation de la chaleur par l'extérieur. Chez les animaux ayant un pelage clairsemé et/ou la peau fine, la peau rougit (d'où le teint rouge d'un humain qui a trop chaud).
- Elle provoque la sécrétion par les glandes sudoripares (glandes épidermiques) de la sueur, qui est libérée sur la peau. Son évaporation provoque un refroidissement de l'épiderme, grâce à l'importante

chaleur latente d'évaporation de l'eau (2 300 kJ/kg, une valeur exceptionnellement élevée en comparaison d'autres substances usuelles liquides à température ambiante).

L'ensemble de ces réactions a pour conséquence une diminution de la température, jusqu'à ce que l'organisme atteigne à nouveau la valeur de consigne de 38°C.

La thermorégulation illustre donc le principe d'une boucle de régulation d'un paramètre interne. Quelle que soit la grandeur étudiée :

- Si la valeur (ici la température) s'éloigne de la valeur de consigne (ici 38°C), elle est détectée par un capteur (ici l'hypothalamus).
- Le capteur communique (ici, par voie nerveuse et/ou hormonale) à un système effecteur (ici, les muscles horripilateurs, les glandes sudoripares, les artéioles dermiques, etc.).
- Le système effecteur provoque une réaction qui provoque le retour de la valeur à la valeur de consigne.

On pourra noter qu'il existe, au-delà du strict effet physiologique une réponse comportementale à des changements de la température interne. Les animaux peuvent adopter un comportement grégaire (ils se rassemblent) en cas de température trop froide, et ils recherchent l'ombre d'un arbre en cas de température trop chaude.

Des adaptations génétiques existent, permettant aussi de limiter les variations de température. Il ne s'agit cependant pas de boucle de régulation. On pourra citer :

- La présence d'un pelage abondant et épais, ainsi que d'une couche épaisse de graisse dermique, qui joue le rôle d'isolant. On pourra citer pour l'illustrer le cas de la race bovine highland, une race écossaise au poil long.
- Une taille importante, qui augmente le rapport masse/taille. La production de chaleur est proportionnelle au volume de l'animal, donc à  $L^3$  (avec  $L$  la dimension de l'animal, assimilé à une sphère) ; la déperdition de chaleur, qui se fait à travers la peau, selon la loi de Fourier, est en revanche proportionnelle à  $L^2$  ; donc le rapport déperdition/production est proportionnel à  $1/L$  : un gros animal perd moins de chaleur qu'un petit.

Enfin, il convient de ne pas confondre **adaptation évolutive** (concept applicable à une espèce ou un groupe d'individus, d'origine génétique, comme par exemple le pelage épais de la highland) et une **adaptation physiologique** (qui modification du phénotype au cours de la vie d'un individu, comme par exemple la régulation de la température par une boucle de régulation).

De nombreux autres paramètres que la température sont régulés, comme la volémie (le volume de sang), la pression artérielle, le débit cardiaque, la glycémie (taux de glucose sanguin), la testostéronémie (taux de testostérone dans le sang), etc.

### 3. L'animal se déplace grâce à un squelette et des muscles

Le squelette des vertébrés est une structure interne constituée d'organes durs, les os, dont les tissus ont une matrice extracellulaire imprégnée d'hydroxyapatite. Si certains os sont soudés entre eux, la plupart sont mobiles les uns par rapport aux autres, au niveau d'articulations. Le cartilage articulaire rend la jonction entre deux os souple. La synovie, un liquide gélifié riche en polymère glucidiques et en protéines qui lubrifie l'articulation. Les os des articulations sont solidaires grâce aux tendons.

Les muscles striés squelettiques sont des organes dont les cellules principales (les fibres musculaires, ou cellules musculaires striées squelettiques) sont contractiles, c'est-à-dire qu'elles sont capables de se raccourcir dans leur plus grande longueur. C'est l'interaction entre l'actine et la myosine, deux protéines du cytosquelette, qui permet cette contraction, et grâce à l'énergie de l'ATP. Dans les cas les plus courants, un muscle est relié à deux os via des tendons. La contraction du muscle a pour conséquence la mise en mouvement de l'articulation. Chaque articulation dispose d'au moins deux muscles dits antagonistes :

- L'un est fléchisseur, et permet de plier l'articulation.
- L'autre est extenseur et permet d'ouvrir l'articulation.

La plupart du temps, de nombreux autres muscles existent, qui permettent des mouvements plus complexes (rotation, mouvements dans différents plans).

La commande musculaire est permise par des **motoneurones**, qui sont des nerfs efférents. Au niveau de la jonction neuromusculaire, un neurotransmetteur (l'acétylcholine) est libéré dans la fente synaptique et est reçu par un récepteur nicotinique situé sur la membrane plasmique de la fibre musculaire. La fixation de l'acétylcholine sur son récepteur provoque la contraction musculaire, par des mécanismes qui seront vus dans le chapitre suivant.

Les motoneurones peuvent être à commande volontaire s'ils reçoivent leur stimulation depuis le **cortex moteur**, mais ils peuvent également être activés par voie réflexe, comme c'est le cas pour le réflexe myotatique. La plupart des muscles possèdent des capteurs sensibles à l'étirement, et sont reliés à des réseaux de neurones permettant un réflexe myotatique. Ces réflexes, qui peuvent être mis en évidence par un choc léger sur un tendon, permettent à ces muscles de contribuer à ce que le corps reste en équilibre, y compris lorsqu'il est en mouvement.

#### **4. L'animal se protège des agressions extérieures**

Divers organes et systèmes physiologiques concourent à la protection de l'animal contre les agressions du milieu extérieur.

La principale barrière est constituée par la peau, constituée elle-même d'un épiderme (la couche épithéliale, la plus externe) et un derme (la couche interne). Elle permet d'empêcher l'intrusion des bactéries dans l'organisme.

Une protection physiologique importante contre les pathogènes est permise par le système immunitaire. Chez les vertébrés, l'immunité innée (macrophages, système du complément) permet de détruire de nombreux microorganismes de façon non spécifique ; l'immunité adaptative, basée sur les lymphocytes B (producteurs d'immunoglobulines) et T (cytotoxiques notamment), permet une adaptation spécifique aux pathogènes, si bien qu'un pathogène déjà rencontré produira une réponse plus forte et plus efficace que lors de la première rencontre. Ce principe est à la base de l'immunité vaccinale – qui, chaque année, sauve la vie de dizaines millions de personnes dans le monde. Les cellules immunitaires sont produites par la moelle osseuse des os plats et renouvelées tout au long de la vie de l'individu.

#### **5. L'organisme a des relations avec ses congénères et d'autres espèces**

##### **a) Les relations intraspécifiques**

On appelle relations intraspécifiques les relations entre individus de la même espèce. Les relations intraspécifiques sont nombreuses, car la vache est grégaire (elle vit en communauté). Comme c'est le plus souvent le cas chez les espèces grégaires, il existe des relations basées sur la domination et la soumission. Les taureaux sont isolés, sauf au moment de la reproduction ; dans ce cas, ils dominent toutes les femelles. Ce qui suit s'applique iniquement aux vaches (sous-entendu femelles).

On teste la domination ou la soumission entre les vaches par l'accès à la nourriture :

- On place un bol contenant de la nourriture, tel que seule une vache peut se nourrir à la fois.
- On introduit deux vaches dans l'enclos contenant la nourriture.
- La vache qui s'alimente la première est la vache dominante.

Chaque animal a une place précise dans la hiérarchie. La structuration hiérarchique peut être linéaire, de façon assez intuitive, mais peut également être très complexe au point d'en être déroutante, comme on le montre dans le document 28. Les relations de domination peuvent être plus ou moins violentes et plus ou moins fortes. Deux vaches peuvent également avoir des affinités, auquel cas il n'y aura pas à proprement parler de domination ou de soumission entre ces deux individus. Habituellement, il existe une préférence parentèle, c'est-à-dire des affinités particulières entre individus apparentés (notamment entre une vache



adulte et sa mère), même si ce cas général souffre de nombreuses exceptions.

La mise en place de la domination se fait à la puberté (les veaux ne montrent pas de relation de domination entre eux ni avec les adultes). Elle peut également être modifiée lors de l'introduction d'une nouvelle vache dans le troupeau, ou au départ d'un individu. Elle peut se traduire par divers degrés d'agressivité (de la fuite à la lutte, en passant par les menaces et les coups). On peut montrer que l'odorat est le principal sens impliqué dans la reconnaissance des individus et dans la pérennité des relations hiérarchiques, et que la vue n'a peu ou pas de rôle dans cette reconnaissance.

Il est peut être bon de rappeler que les relation sexuelles n'entrent pas dans le cadre des fonctions de relation, mais de la fonction de reproduction. Il faudra veiller à éviter cette confusion !

b) Des relations interspécifiques

Les relations interspécifiques désignent les relations entre la vache et d'autres espèces. Elles peuvent être avantageuse, désavantageuses ou neutres pour l'un ou l'autre des partenaires. Les principaux types de relations sont illustrés dans le tableau ci-dessous par des exemples. On précise pour chacune des deux espèces s'il s'agit d'une interaction bénéfique, néfaste ou neutre.

Exemple	espèce A : bénéfique (+), néfaste (-) ou neutre (0)	espèce B : bénéfique (+), néfaste (-) ou neutre (0)	Nom
La vache piétine l'herbe	vache : 0	herbe : -	amensalisme
La douve (ver) parasite le foie de la vache	vache : -	ver : +	parasitisme / herbivorie / prédation
Le bousier consomme les bouses	vache : 0	bousier : +	commensalisme
Les microorganismes vivent dans la panse et digèrent l'herbe	vache : +	microorganismes : +	mutualisme / symbiose
La vache et le criquet consomment l'herbe	vache : 0	criquet : 0	neutralisme
Des vaches et des moutons cohabitent dans la même prairie	vache : -	mouton : -	compétition

## Conclusion :

Le fonctionnement d'un animal comme la vache peut être compris et analysé via une clé de lecture en trois parties, correspondant aux trois grandes fonctions standardisées :

- Les fonctions de nutrition assurant les échanges en matières et en énergie avec le milieu extérieur (digestion et absorption des nutriments, échanges de gaz respiratoires, transport des nutriments, gaz respiratoires et déchets, élimination des déchets du métabolisme).
- Les fonctions de reproduction, permettant de produire de nouveaux individus et de perpétuer l'espèce (fécondation, développement embryonnaire et post-embryonnaire, lactation).
- Les fonctions de relation, permettant les interactions entre l'individu et son milieu (interaction intraspécifiques biotiques ou non, intégration et régulation des paramètres internes, protection contre les agressions extérieures).

Comme cela a été précisé en début de chapitre, la vache doit être vue comme un exemple précis permettant de construire des concepts généralisables à l'ensemble des animaux, voire à l'ensemble des animaux. Si les structures de l'échangeur respiratoire ou de l'appareil circulatoire, par exemple, ne sont pas généralisables, le concept d'échange respiratoire et de transport des nutriments l'est.

L'ensemble des connaissances relatives à ce chapitre peuvent et doivent être réinvesties en séances de travaux pratiques.

Il doit être noté que si l'animal peut être abordé sous le prisme des trois grandes fonctions, elles ne sont pas indépendantes : elles coopèrent de façon à permettre le fonctionnement de l'organisme. Cette notion peut paraître évidente, mais elle est en réalité au cœur de la compréhension d'un organisme animal et de son fonctionnement. Afin de nourrir la réflexion, on pourra noter, à titre d'exemple et de façon non exhaustive :

- La reproduction est rendue impossible par une nutrition déficiente, qui limite la fécondité, et peut provoquer des malformations de l'embryon (voire des avortements) → fonctions de reproduction et de nutrition coopèrent.
- La reproduction serait impossible sans systèmes sensoriels (taureau et vache doivent pouvoir se voir et/ou se sentir avant l'acte sexuel) et sans intégration des stimuli → fonctions de reproduction et de relations coopèrent.
- Le sang transporte les nutriments et déchets (fonctions de nutrition), mais également les hormones (fonctions de relation, ou même fonctions de reproduction s'il s'agit d'hormones sexuelles) : le sang est un exemple parfait qui montre que fonctions de relation, de reproduction et de nutrition sont interconnectées, en utilisant les mêmes systèmes (le système circulatoire ici).

Dans les quatre chapitres suivants, on se focalisera sur les aspects plus strictement moléculaires et cellulaires du fonctionnement d'un organisme, notamment animal :

- Chapitre B2 : organisation fonctionnelle des molécules du vivant, où l'on rendra un culte au carbone tout-puissant et à ses disciples, les molécules organiques.
- Chapitre B3 : membranes et interrelations structurales, où l'on verra que les cellules sont des forteresses *a priori* protégées par des frontières imperméables.
- Chapitres B4 : membranes et échanges, où l'on verra que tout un tas de molécules passent à travers les passoirs que constituent les membranes, de façon plus ou moins contrôlée.
- Chapitre B5 : potentiel de membrane et potentiel d'action, où l'on verra que les échanges à travers la membrane permettent le codage et le transport du message nerveux.