

REGARDS SUR L'ORGANISME ANIMAL : LA VACHE

Les organismes vivants sont caractérisés par leurs capacités :

- à se maintenir en vie en puisant dans l'environnement la matière et l'énergie nécessaires. Ils réalisent ainsi des conversions énergétiques leur permettant de se maintenir dans un état stationnaire de non-équilibre : ils maintiennent constants leur forme et leurs limites, ainsi que certains paramètres physico-chimiques internes, malgré les changements externes ;
- à se développer selon une certaine organisation ;
- à se reproduire ;
- à modifier leur physiologie et/ou leur comportement en réponse à des stimuli externes.

D'un point de vue structural, les organismes vivants sont constitués des mêmes molécules organiques : glucides, lipides, protéines et acides nucléiques. La cellule est l'unité fondamentale du vivant. Dans le cas des organismes pluricellulaires, elle fonctionne de façon autonome mais coordonnée avec les autres. Les cellules ayant des fonctions similaires y sont regroupées en tissus (exemple : les cellules de l'épithélium intestinal), différents tissus assurant une fonction commune sont assemblés en organes (exemple : l'intestin grêle). Différents organes concourant à la même fonction constituent un appareil ou système (exemple : l'appareil digestif). Organes et appareils accomplissent des fonctions distinctes, mais corrélées entre elles, dans l'organisme auquel ils appartiennent. On définit le plan d'organisation d'un organisme comme l'agencement de ses différents organes et appareils.

Dans le cas des animaux, les matériaux et l'énergie nécessaires au développement, au fonctionnement, à la conservation de l'intégrité et à la reproduction de l'organisme proviennent des aliments : les animaux sont des organismes hétérotrophes.

Les grandes fonctions qui les caractérisent sont :

- les fonctions de nutrition qui assurent l'apport aux différents organes des substances indispensables au fonctionnement de leurs cellules et l'élimination des déchets produits par leur activité. Ces fonctions sont assurées par les appareils digestif, respiratoire, excréteur et cardio-vasculaire ;
- la fonction de reproduction qui permet la perpétuation de l'espèce, elle est assurée par l'appareil reproducteur ;
- les fonctions de relation qui permettent d'enregistrer les variations du milieu extérieur, de réagir à ses variations et de se déplacer dans ce milieu. Ces fonctions sont assurées par les systèmes nerveux, endocrinien, musculaire, osseux, tégumentaire et immunitaire.

Dans ce chapitre, l'étude d'un organisme animal, fondée sur l'exemple de la vache, permettra de comprendre les grandes fonctions et de les mettre en relation avec les structures associées.

On désignera sous le terme vache un bovin domestique âgé de plus de 24 mois.

Qu'est-ce qu'une vache ? (ou Famille de la vache et vache en famille)

La vache appartient au groupe des **ruminants** qui sont des **mammifères onguligrades**, c'est-à-dire marchant sur la dernière phalange qui est munie d'un sabot, et ayant un nombre pair de doigts. La famille des **bovidés** est la famille de ruminants la plus importante, elle est caractérisée par la présence dans les deux sexes, au moins chez les formes sauvages, de cornes osseuses recouvertes d'un étui corné. Les bovidés domestiqués se répartissent dans trois groupes : les bovins (vaches), les ovins (moutons) et les caprins (chèvres).

Le nom scientifique de la vache domestique d'Europe est *Bos taurus taurus*. En Asie et en Afrique, on élève le zébu *Bos taurus indicus*. Un **veau** est un jeune, mâle ou femelle, âgé de moins de 6 mois. Une **génisse** est un bovin femelle de plus de 6 mois qui n'a pas encore vêlé, elle devient une **vache** vers l'âge de 2 ou 3 ans, dès son premier veau. Un taurillon est un bovin mâle âgé de 6 à 24 mois, un **taureau** est un mâle adulte âgé de plus de 24 mois non castré, un **boeuf** est un mâle adulte âgé de plus de 24 mois, castré.

46 races de vaches sont reconnues en France (arrêté n°AGRP0761512A du 26 juillet 2007, modifié le 22 décembre 2011), 85% du cheptel français est représenté par 5 races (Prim'Holstein, Charolais, Normande, Montbéliarde, Limousine). 18 millions d'individus élevés en France constituent le plus grand cheptel d'Europe. Selon les races, une vache adulte pèse entre 400 et 1.100 kg, un taureau pèse entre 600 et 1700 kg. Un veau pèse environ 40 kg à la naissance. Une vache laitière produit en moyenne 18 à 25 litres de lait par jour, et même jusqu'à plus de 40 litres pour les meilleures laitières. La France est le 1er pays laitier d'Europe.

I L'organisme animal échange matière et énergie avec son environnement

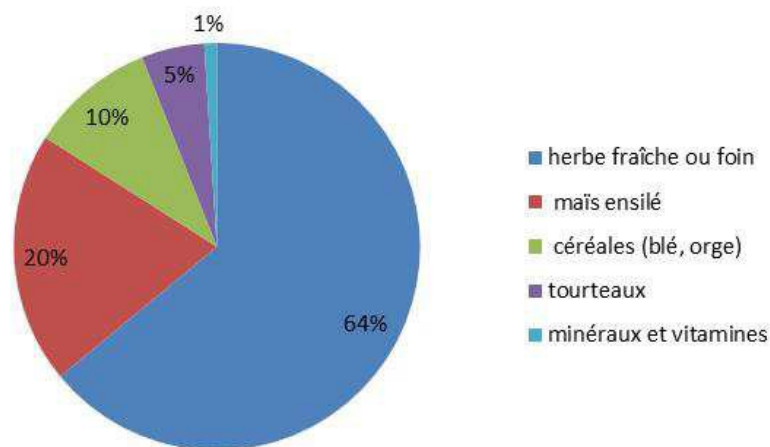
La vache est hétérotrophe : elle puise sa matière organique dans le milieu. Les aliments apportent la matière première pour la production de nouveaux tissus, leur régénération, ainsi que pour la reproduction. Ils constituent aussi une source d'énergie pour toutes les activités de l'organisme.

A/ Prélèvement des nutriments par l'appareil digestif

1. La vache est un herbivore ruminant

a) Caractéristiques des aliments de la vache

La vache est un animal **phytophage**, la majorité de sa ration alimentaire étant constituée d'herbe. Elle ingère environ 1% de sa masse par jour. La ration alimentaire varie en fonction des saisons : herbe fraîche au pâturage à la belle saison, foin et ensilage pendant l'hiver. En pleine lactation, l'alimentation est complétée par des céréales, des granulés végétaux (luzerne déshydratée) et des tourteaux (soja, colza ou tournesol)



Composition moyenne de la ration alimentaire d'une vache laitière élevée en France

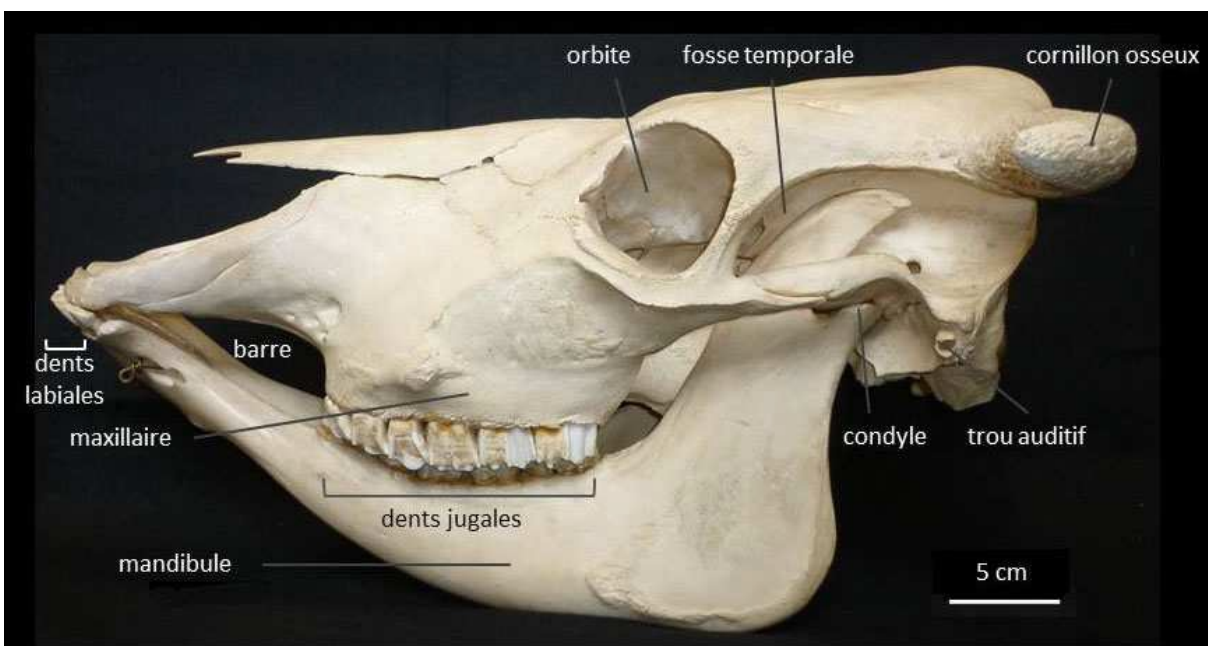
Le maïs ensilé est broyé et conservé en anaérobiose. Les tourteaux sont les résidus solides obtenus après extraction de l'huile des graines ou des fruits oléagineux (soja, colza ou tournesol). Les tissus

végétaux sont caractérisés par une abondance en polymères glucidiques complexes pour lesquels la vache ne possède pas d'enzymes digestives (cellulose, hémicelluloses, pectines, lignine), une relative pauvreté des molécules protéiques et lipidiques par rapport aux composés glucidiques.

b) Particularités anatomiques de l'appareil digestif de la vache

Les mâchoires et la denture de la vache sont adaptées à une alimentation phytophage : *

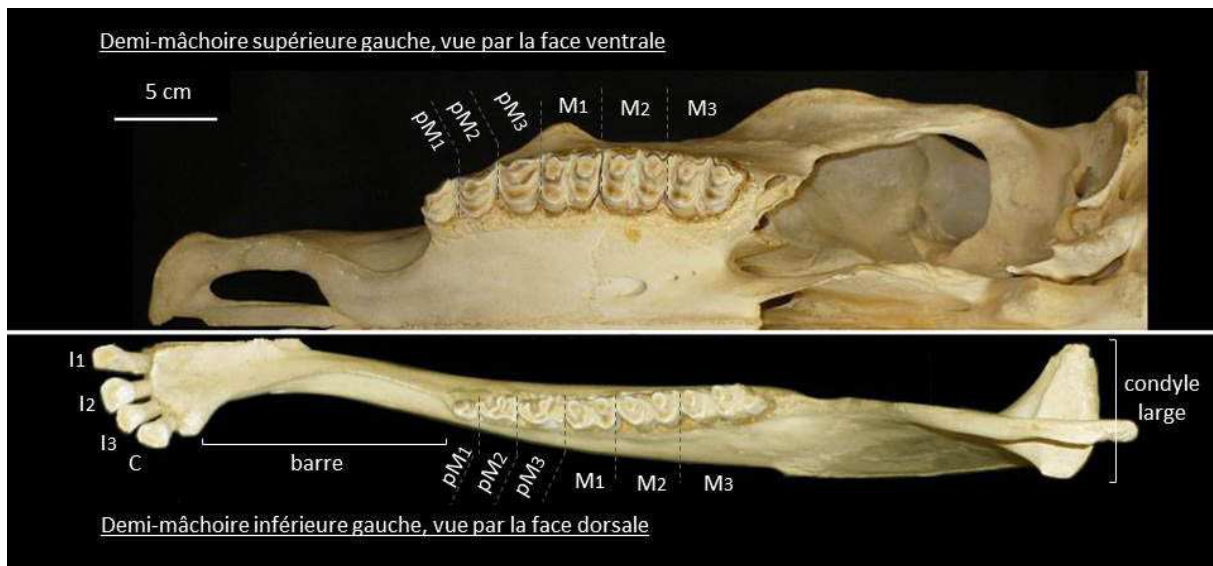
- Les mâchoires sont très allongées, les condyles articulant la mandibule avec le crâne permettent des mouvements latéraux très étendus.
- La mâchoire supérieure est dépourvue d'incisives et de canines. Le bord antérieur du plafond buccal est fortement kératinisé. Chaque demi-mâchoire supérieure porte six dents jugales : trois **prémolaires** semblables entre elles et trois **molaires** également semblables entre elles.
- Chaque demi-mâchoire inférieure porte quatre dents labiales : trois **incisives** coupantes à croissance limitée et une **canine incisiforme** suivies d'un large espace appelé barre. Suivent six dents jugales : trois prémolaires et trois molaires. Les prémolaires et molaires sont des dents à croissance continue. Elles sont ainsi régénérées au fur et à mesure de leur usure par les herbes. En effet, les Poacées, abondantes parmi les végétaux consommés, présentent des accumulations de silice abrasive dans les parois cellulaires. Il se forme ainsi une table d'usure au dessin en croissant caractéristique, comprenant des **crêtes d'émail dur**, allongées d'avant en arrière, séparées par des vallées d'**ivoire** et de **cément**. Le cément est le tissu recouvrant la racine qui envahit les espaces situés entre les crêtes.



Tête osseuse de la vache

La formule dentaire indique le nombre et la nature des dents par demi-mâchoire. Elle est représentée sous forme de fraction, les dents du haut en numérateur, les dents du bas en dénominateur (I = incisive, C = canine, pM = prémolaire, M = molaire).

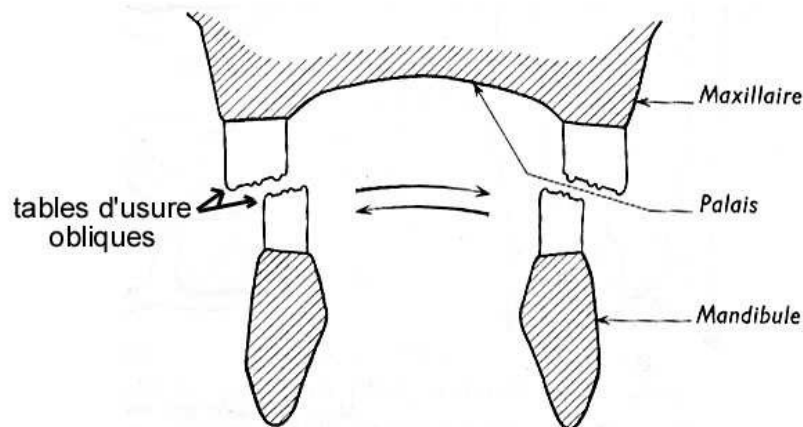
$$\frac{0}{3}I + \frac{0}{1}C + \frac{3}{3}pM + \frac{3}{3}M \text{ ou } \frac{0.0.3.3}{3.1.3.3}$$



Denture de la vache

Dents labiales : I1, I2, I3 : incisives inférieures, C : canine inférieure incisiforme.
 Dents jugales : pM1, pM2, pM3 : prémolaires ; M1, M2, M3 : molaires

Lorsque la bouche se ferme, les dents labiales inférieures viennent s'appliquer contre la surface kératinisée de la mâchoire supérieure. L'ensemble joue un rôle préhenseur partagé avec les lèvres fortement musclées mais peu mobiles, et la langue longue, mobile et râpeuse. Les prémolaires et les molaires fonctionnent à la manière d'une râpe animée par les mouvements latéraux de la mandibule.

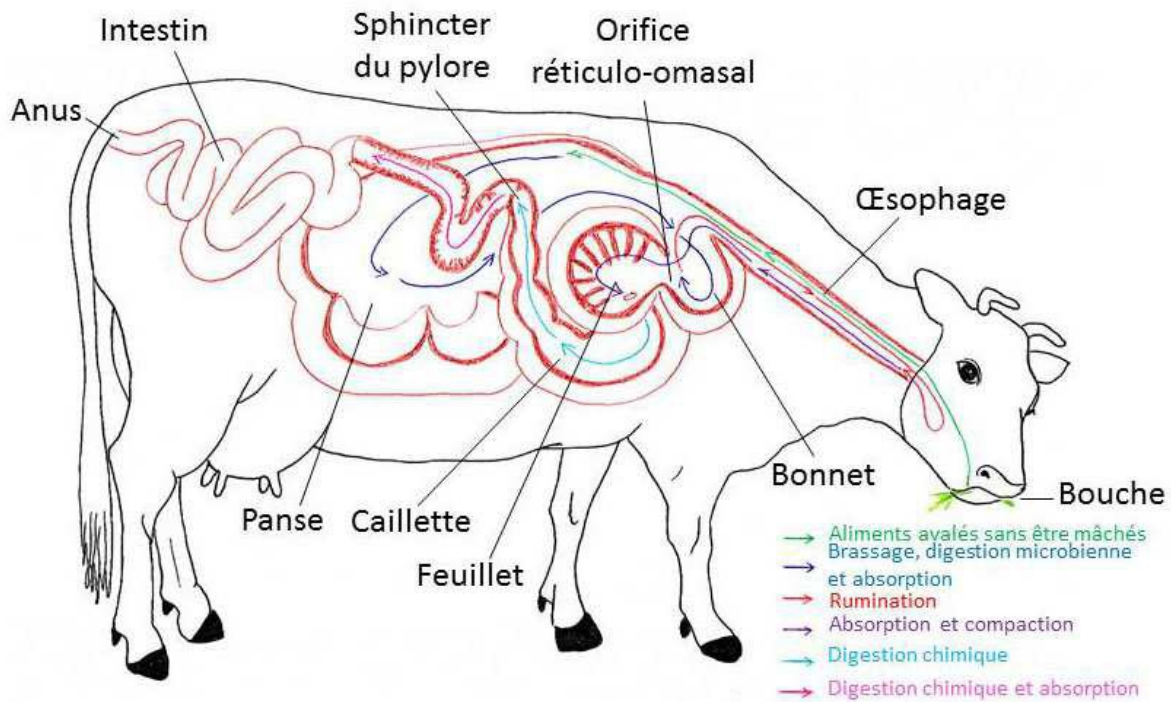


Coupe frontale schématique des mâchoires montrant les mouvements latéraux de la mandibule.

Ces spécialisations des mâchoires et de la denture de la vache permettent de récolter très rapidement des aliments en broutant (pâturage) puis ensuite de les mastiquer plus soigneusement quand la vache est au repos (**ruminantion**). La vache pâture préférentiellement à l'aube et au crépuscule, alors que la ruminantion est essentiellement nocturne.

Ce mode de prise alimentaire constitue une adaptation pour les bovidés sauvages (antilopes par exemple) qui sont la proie des carnivores. En effet, le temps de prise de nourriture, durant lequel l'animal est vulnérable, est réduit, et la mastication est différée jusqu'à ce que l'animal puisse se cacher dans un endroit relativement protégé des prédateurs.

La partie antérieure du tube digestif de la vache, de la cavité buccale à l'estomac, est particulièrement développée :

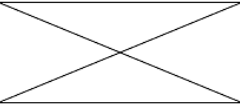



Anatomie du tube digestif de la vache et trajet des aliments lors de la rumination

L'estomac des Ruminants est qualifié de « **polygastrique** ». Quatre chambres, distinguées par des épithéliums différents, se succèdent de l'avant vers l'arrière : la **panse**, le **bonnet**, le **feuillet** et la **caillette**.

A : Panse = Rumen B : Bonnet = Réticulum C : Feuillet = Omasum D : Caillette = Abomasum



		Caillette = Abomasum		Digestion par hydrolases gastriques	
Partie postérieure du tube digestif	Intestin grêle		18 %	Digestion par hydrolases pancréatiques et intestinales Absorption	Eau, oses, acides aminés, acides gras, nucléotides
	Gros intestin	Cæcum	3 %	Digestion par l'activité des micro-organismes Absorption	Acides gras volatils
		Colon	8%	Absorption	Eau, ions minéraux
		Rectum		Stockage des fèces	

Caractéristiques et fonctions des différents segments du tube digestif de la vache

Volumes pour une vache d'environ 600 kg.

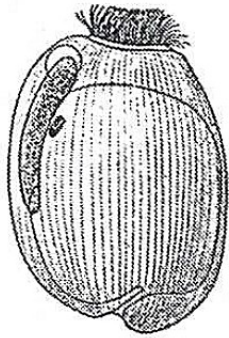
c) Stockage, digestion des aliments et absorption de nutriments dans la partie antérieure du tube digestif

Premières transformations des aliments dans la panse

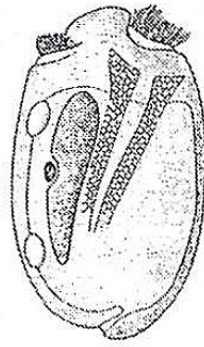
La nourriture végétale, avalée sans être mastiquée, passe d'abord dans le réticulo-rumen où les aliments fibreux sont stockés et brassés. Les conditions régnant dans la panse sont une anaérobiose, un pH compris entre 5,5 et 7,3, une température élevée 40°C (supérieure à la température rectale de 38 °C). Ces conditions sont favorables au développement d'une abondante **flore microbienne** qui produit les enzymes capables de digérer des glucides, des protéines et des lipides.

	Abondance	Quelques espèces	Molécules hydrolysées
Bactéries	10 ⁹ à 10 ¹⁰ /mL de jus de rumen	<i>Bacteroides succinogenes</i> <i>Ruminococcus albus</i> <i>Ruminococcus flavefaciens</i> <i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	cellulose
		<i>Bacteroides ruminicola</i> <i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	hémi-celluloses protéines
	1 kg de bactéries chez un bovin	<i>Bacteroides amylophilus</i> <i>Streptococcus bovis</i> <i>Bacteroides ruminicola</i>	Amidon protéines
Ciliés	10 ⁴ à 10 ⁶ /mL de jus de rumen 2 kg de ciliés chez un bovin	Entodiniomorphes	Glucides, certaines espèces sont cellulolytiques Protéines Lipides (galactolipides)
Champignons (moisissures)	10 ⁴ /mL de jus de rumen		Fibres indigestibles par les autres micro- organismes

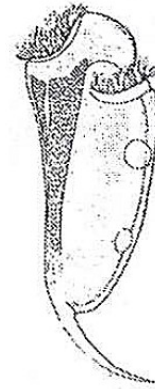
Flore microbienne du rumen



Entodinium longinucleatum



Diplodinium multivesiculum



Epidinium ecaudatum

Quelques ciliés du rumen

Les glucides structuraux (cellulose, hémicelluloses et pectines), l'amidon, ainsi que les protéines sont hydrolysés par les micro-organismes et fermentés. 40 à 75 % des protéines végétales sont ainsi digérées. Les produits terminaux de ces fermentations sont des **acides gras volatils** à chaîne courte (acétate (2 carbones), propionate (3 carbones), un peu de butyrate (4 carbones)), du dioxyde de carbone (CO₂), du méthane (CH₄) et de l'ammoniac (NH₃). D'autre part, les bactéries possèdent des enzymes permettant la détoxification des alcaloïdes formés par les plantes.

Rumination :

Les aliments qui n'ont pas été digérés flottent à la surface de la panse et sont régurgités dans la bouche pour y être mâchés longuement, mélangés à la salive puis ce bol alimentaire est ré-avalé. Cette étape est la rumination qui favorise le broyage des fibres végétales et les rend plus accessibles aux attaques microbiennes.

Rôle de la salive :

La salive, produite par les glandes salivaires, est très abondante (100 à 200 L/jour), elle est dépourvue d'amylase salivaire. Par sa richesse en bicarbonates de sodium (Na⁺, HCO₃⁻), elle a un rôle tampon pour la panse. D'autre part, l'urée fabriquée par le foie et circulant dans le sang est sécrétée dans la salive, elle est hydrolysée rapidement par les uréases bactériennes (35% des bactéries du rumen ont cette capacité) en ammoniac. Ce dernier est réutilisé par les bactéries pour la synthèse de leurs acides aminés. Le surplus d'ammoniac est absorbé par la paroi du rumen et retransformé en urée par le foie.

Remarque : l'ajout d'urée dans la ration de la vache (au maximum 30 g d'urée / 100 kg de masse corporelle) est une méthode peu coûteuse couramment utilisée pour enrichir l'apport en azote de l'alimentation.

Interactions entre les différents micro-organismes de la panse :

Outre les substances alimentaires de la vache, les ciliés ont pour source d'alimentation essentielle les bactéries de la panse qu'ils phagocytent. Ils joueraient ainsi un rôle régulateur vis-à-vis de la flore bactérienne du rumen, et amélioreraient indirectement son efficacité dans la digestion de la cellulose.

Devenir des produits des activités bactériennes :

Les acides gras volatils sont absorbés par les papilles de l'épithélium de la panse qui en augmentent la surface, et sont acheminés au foie par la veine porte hépatique. Le méthane et le dioxyde de carbone sont éliminés par **éructation** (1000 L de gaz/jour). Un tiers du flux de carbone serait ainsi perdu.

Les bactéries synthétisent des **acides aminés essentiels** (i.e. que la vache ne synthétise pas elle-même) et des vitamines du groupe B qui sont absorbés par la vache.

Absorption dans le feuillet

Périodiquement de petits volumes (150 à 200 mL) du contenu du réticulo-rumen passent dans le feuillet par l'orifice réticulo-omasal. Les lames du feuillet permettent l'absorption d'acides gras volatils, d'eau et d'ions, font refluer les plus grandes particules vers le bonnet et laissent passer le liquide directement vers la caillette. Le **bol alimentaire** est ainsi desséché et comprimé.

Digestion chimique dans la caillette

Les contractions des parois du feuillet font passer le bol alimentaire dans la caillette qui constitue le véritable estomac : son épithélium en possède les glandes caractéristiques sécrétant de l'acide chlorhydrique et du pepsinogène, précurseur de la pepsine qui assure la digestion des protéines. Le pH gastrique est voisin de 2, qui est le pH optimal pour l'activité de la pepsine. L'épithélium gastrique sécrète aussi du **lysozyme**, une enzyme qui hydrolyse les composés de la paroi bactérienne. La vache digère donc les micro-organismes du rumen. On estime que la vache consomme entre 1 kg et 1,5 kg de bactéries et protistes par jour, qui constituent un apport protéique d'au moins 100 g par jour.

Remarque : L'épithélium de la caillette des jeunes veaux non sevrés sécrète de la présure, contenant une protéase, la chymosine qui fait cailler le lait. Les propriétés coagulantes de la présure sont utilisées en fromagerie.

Le contenu de l'estomac, qui le quitte vers l'intestin grêle lors des ouvertures périodiques du sphincter du pylore, a la consistance d'une bouillie. Il constitue le **chyme**, d'un volume de 250 L par jour chez la vache. Le chyme contient peu d'oses libres issus des végétaux car ceux-ci ont été consommés par les bactéries du rumen, des protéines, dont 50% sont d'origine bactérienne, des acides gras saturés à longue chaîne (acide palmitique à 16 carbones et acide stéarique à 18 carbones), liés aux particules alimentaires, et des phospholipides.

L'organisation particulière de « l'estomac » permet la digestion de la cellulose. Des micro-organismes variés cohabitent et entretiennent des relations diverses : compétition, symbiose, prédation ; le rumen constitue ainsi un véritable **écosystème**.

La vache est en **symbiose** avec la flore microbienne de sa panse : elle offre des conditions de vie favorables aux micro-organismes et leur apporte de la nourriture, tandis que les micro-organismes possèdent l'équipement enzymatique leur permettant de dégrader la cellulose et produisent des molécules utilisées par la vache. Une symbiose est une association d'organismes à bénéfices réciproques.

La paroi du rumen constitue une surface d'absorption digestive qui n'existe pas chez les Mammifères non ruminants.

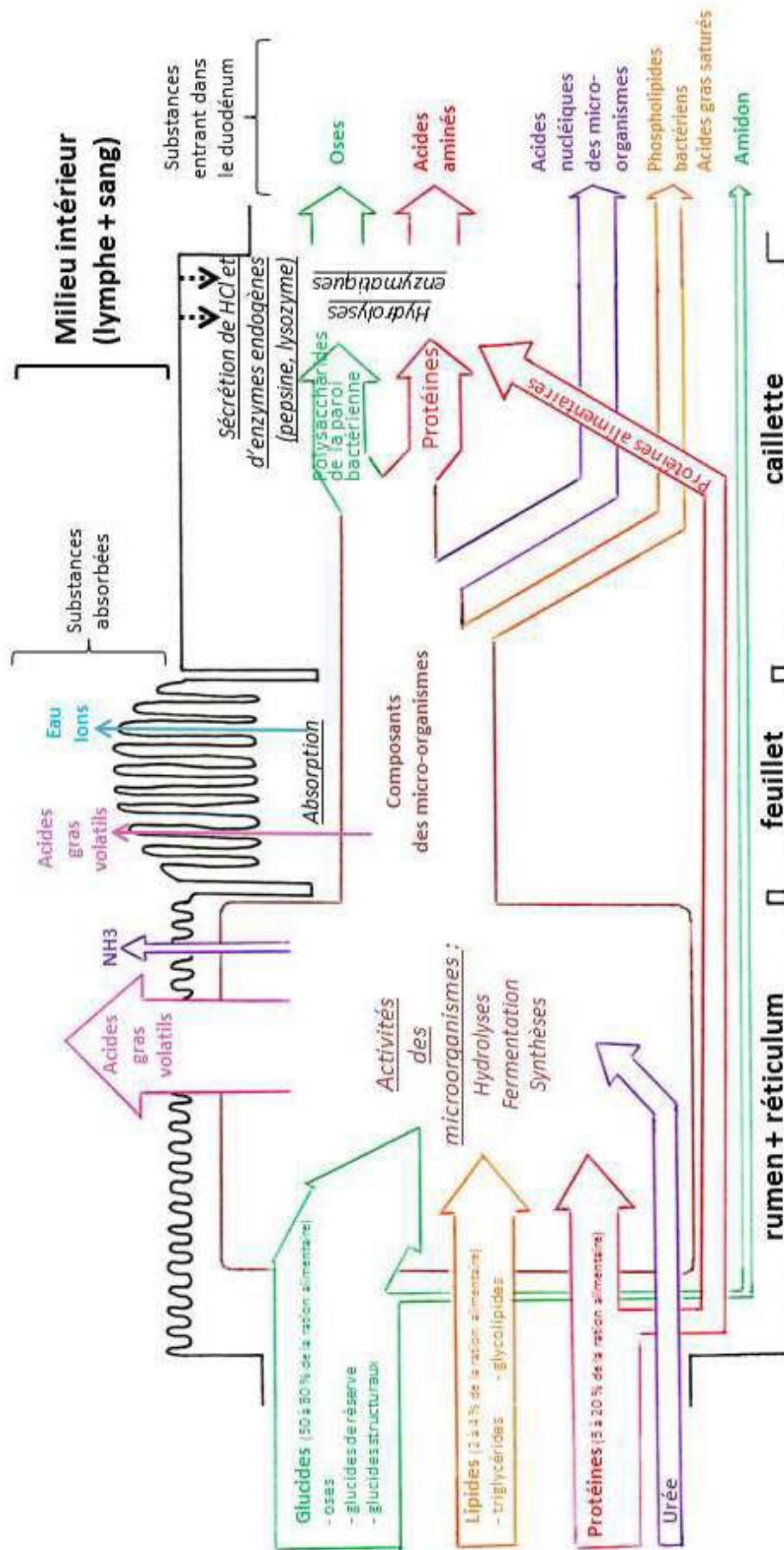


Schéma-bilan de la digestion et de l'absorption dans « l'estomac » de la vache
 d) Digestion chimique et absorption dans l'intestin grêle

L'**intestin grêle**, long de 46 m chez la vache et d'un diamètre de 5 cm, est formé de 3 segments : le duodénum, le jéjunum et l'iléon.

Digestion chimique :

Le duodénum reçoit les sécrétions de deux **glandes digestives** : le pancréas et le foie.

- Le **pancréas** sécrète le suc pancréatique. Il contient de nombreuses enzymes digestives : l'α-amylase, des protéases diverses (trypsine, chymotrypsine, élastase, carboxypeptidases), une phospholipase qui hydrolyse les phospholipides bactériens, ainsi que des nucléases particulièrement abondantes. Les enzymes pancréatiques nécessitent un pH neutre ou légèrement alcalin pour avoir une activité optimale. La richesse en bicarbonates du suc pancréatique contribue à la neutralisation de l'acidité du chyme en provenance de l'estomac. La sécrétion des enzymes pancréatiques est sous contrôle nerveux et hormonal.

- Le **foie** sécrète la bile, stockée dans la vésicule biliaire d'où elle s'écoule de façon continue dans l'intestin de la vache par le conduit cholédoque. Les sels biliaires détachent les acides gras des particules auxquelles ils sont liés, et émulsifient les lipides, ce qui, en augmentant leur surface d'attaque, facilite leur digestion. D'autre part elle contient des déchets, provenant de l'épuration du sang par le foie, qui seront soit digérés soit éliminés. Enfin, elle participe au contrôle du pH duodénal en association avec le suc pancréatique.

L'épithélium intestinal contient lui-même des cellules sécrétrices qui libèrent du mucus, protégeant la muqueuse intestinale de l'autodigestion et participant à la fluidité du chyme. D'autre part les **entérocytes** portent, associées à leur membrane plasmique apicale, des enzymes digestives (peptidases, disaccharidase, phosphatase alcaline). Les entérocytes sont les cellules absorbantes de l'épithélium de l'intestin grêle.

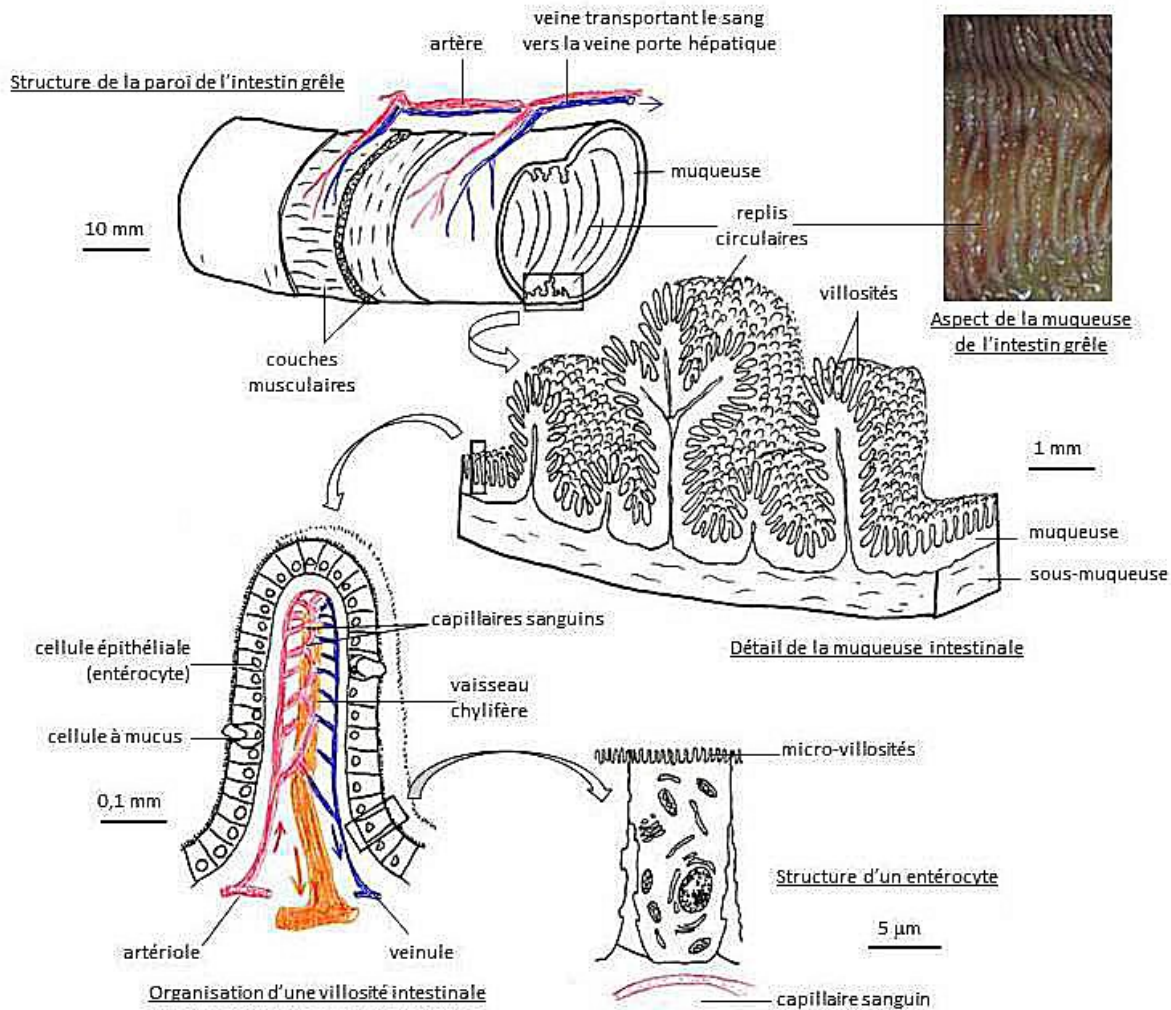
L'intestin grêle est ainsi le siège d'une importante **digestion chimique** au terme de laquelle les molécules alimentaires sont hydrolysées en leurs constituants unitaires qui sont assimilables : oses, acides aminés, acides gras, nucléotides : ce sont des **nutriments**.

La symbiose avec les bactéries du rumen induit des différences par rapport aux autres Mammifères, pour certaines enzymes digestives. Ainsi, l'absence d'amylase salivaire et de lipase pancréatique chez la vache est liée au fait que ce sont les bactéries du rumen qui assurent la digestion de l'amidon et des triglycérides. D'autre part, la sécrétion du lysozyme dans l'estomac est une adaptation à la digestion des bactéries par la vache, les Mammifères non ruminants n'ont pas de lysozyme gastrique. Ce lysozyme présente des différences nombreuses dans la séquence de ses acides aminés par rapport au lysozyme (des larmes ou du lait) des autres mammifères. Ces différences de structure le rendent actif à pH 2, alors que les autres lysozymes ont un pH optimal basique, et le rendent résistant à l'hydrolyse par la pepsine.

Absorption des nutriments :

La paroi de l'intestin grêle forme des replis, qui multiplie la surface par un facteur de 3 à 10. Sur ces replis, la muqueuse forme de nombreuses projections en doigt de gants appelées villosités, leur surface multiplie celle de l'intestin par un facteur 10 à 20. Enfin la membrane plasmique apicale des entérocytes présente de fins prolongements appelés **microvillosités**, qui multiplie encore par 10 la surface.

La surface de l'intestin grêle est donc multipliée par un facteur environ 600 soit une surface totale chez la vache d'environ 4300 m², ce qui constitue une énorme surface d'échange.



La surface de l'intestin grêle constitue une vaste surface d'absorption

La plus grande partie de l'absorption se fait dans le jéjunum. L'eau et les nutriments sont absorbés essentiellement au niveau des microvillosités des entérocytes. Leur transport implique des protéines transmembranaires spécifiques. Selon les molécules, les transferts se font par diffusion simple, diffusion facilitée, transport actif ou endocytose.

Après avoir traversé l'épithélium intestinal, les nutriments passent dans la circulation sanguine ou la circulation lymphatique.

Les muscles lisses de la paroi de l'intestin assurent par leurs **contractions péristaltiques** la progression du contenu de l'intestin.

e) Absorption de l'eau et des ions dans le gros intestin

Le **gros intestin**, long de 10 m chez la vache, est constitué du cæcum, du colon et du rectum, fermé par l'anus. Il reçoit les molécules non dégradées, les résidus indigestes et les produits éliminés par l'organisme (bilirubine provenant de la dégradation de l'hème de l'hémoglobine, par exemple). Le cæcum et le colon renferment une flore microbienne qui assure une fermentation assez similaire à celle qui se déroule dans le rumen. Les acides gras volatils qui en résultent sont absorbés par l'intestin. Ils constitueraient 10 à 15% de l'énergie digestible ingérée par une vache. La majorité des composés azotés générés par l'activité bactérienne ne sont en revanche pas absorbés.

L'épithélium absorbe les ions minéraux et l'excès d'eau du contenu intestinal qui est ainsi transformé en une masse plus compacte, les **fèces**, qui sont stockées dans le rectum et éliminées par l'anus au cours de la défécation.

Les fèces de la vache, communément appelées bouses, sont riches en matières organiques (débris microbiens non digérés) et en matières minérales (azote, phosphore et potassium) et constituent un bon engrais naturel.

2. Les nutriments ont différentes destinées

a) Besoins nutritionnels et particularités du métabolisme des bovins

Les animaux sont des chimio-organotrophes : ils tirent leur énergie des molécules organiques, en les oxydant, et ils en utilisent les constituants comme source de matière pour réaliser leurs synthèses.

Les nutriments constituent une source d'énergie pour l'organisme :

Ils sont oxydés lors de la respiration cellulaire, et l'énergie libérée par ces oxydations est convertie en énergie chimique, sous forme d'ATP, qui est lui-même consommé par les travaux cellulaires. Les oses, mais aussi les acides gras et les acides aminés sont des substrats de la voie respiratoire. Les dépenses énergétiques de l'organisme sont d'une part celles liées à son fonctionnement (activités physiologiques et musculaires, production de chaleur ... = entretien), d'autre part celles liées aux réactions de synthèse (croissance, augmentation pondérale ... = production).

Dans le cas des bovins, les acides gras volatils constituent 60 à 80% de l'énergie alimentaire de la vache ce qui est très différent de ce qu'on observe chez les Mammifères non ruminants pour lesquels le glucose constitue la principale source énergétique. La **faible glycémie** de la vache ($[\text{glucose}]_{\text{sang}} = 0,55 \text{ g.L}^{-1}$ chez la vache contre 1,7 à 1,8 g.L^{-1} chez le porc) est corrélée à cette moindre importance du glucose. Néanmoins les besoins en glucose de l'organisme sont équivalents à ceux d'herbivores non ruminants : pour les neurones qui ne consomment que le glucose, pour les cellules musculaires qui en font des réserves sous forme de glycogène, pour les cellules de la glande mammaire qui synthétisent le lactose du lait à partir du glucose.

En revanche la vache présente une forte concentration sanguine en **acétate** (acide gras volatil à 2 carbonés), il est prélevé par les cellules et oxydé par la respiration mitochondriale.

Nutriments	Vache	Porc
Acides gras volatils	60 à 80 %	5 à 12 %
Acides gras longs	5 à 10 %	5 à 15 %
Acides aminés	15 à 25 %	20 à 30 %
Glucose	0 à 5 %	50 à 70 %

Comparaison de la part des différents nutriments dans l'énergie absorbée chez la vache et le porc, mammifère non ruminant.

Les acides gras volatils, en provenance du rumen, sont acheminés vers le foie. L'acétate y est transformé en cholestérol et acides gras longs. Le propionate (acide gras volatil à 3 carbonés) y sert de précurseur pour la synthèse de glucose. Le glucose est stocké sous forme de glycogène, dans le foie et les cellules musculaires, les acides gras sont stockés sous forme de triglycérides dans le tissu adipeux.

Les nutriments sont des précurseurs pour les synthèses :

Ils sont les unités de construction à partir desquelles l'organisme synthétise ses propres molécules, lors de sa croissance, mais aussi chez l'adulte pour le renouvellement et l'entretien de ses tissus.

Oses, acides gras et acides aminés ont ainsi un **rôle plastique**. Les acides gras volatils permettent la production des acides gras du lait et la production de graisse.

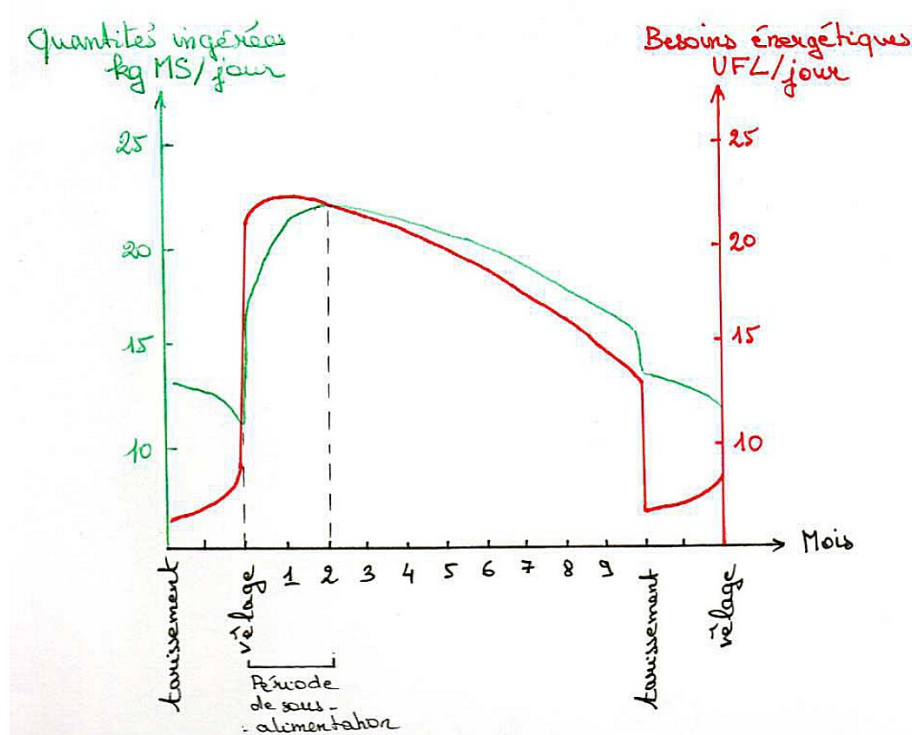
Grâce à leur équipement enzymatique, les animaux peuvent synthétiser de nombreuses molécules à partir de précurseurs moins diversifiés. Ainsi, sur les 20 acides aminés entrant dans la composition des protéines, seulement 10 doivent être trouvés dans l'alimentation, car les animaux ne possèdent pas les enzymes qui permettent de les synthétiser. Ce sont des acides aminés « essentiels ». De même certains acides gras essentiels, et les vitamines doivent être trouvés dans l'alimentation. Certains de ces nutriments essentiels sont, comme on l'a vu, apportés par les synthèses bactériennes (acides aminés essentiels, vitamines du groupe B, vitamine K).

b) Besoins nutritionnels spécifiques de la vache laitière

Nous verrons dans la suite de ce chapitre qu'une vache laitière porte déjà le veau suivant, pendant l'essentiel de sa période de lactation. Aux besoins nutritionnels structuraux et énergétiques cités précédemment, s'ajoutent donc des besoins spécifiques, fonctions de ses dépenses de production de lait et de gestation.

Juste avant la mise-bas, le fœtus requiert environ 10 % de l'ingestion nette d'énergie de la vache, quant à la synthèse du lait, elle peut utiliser plus de 70 % de l'ingestion nette d'énergie.

Il est donc nécessaire d'augmenter la ration alimentaire d'une vache en période de lactation, tant du point de vue quantitatif, que qualitatif (augmentation de l'apport azoté et de certains acides aminés essentiels tels que la lysine et la méthionine, ou de sels minéraux tels que le calcium et le phosphore). Les **besoins en eau** sont aussi accrus : une vache produisant 40 kg de lait consomme environ 120 litres d'eau par jour.



Evolution des quantités de matière sèche ingérées et des besoins énergétiques au cours du cycle physiologique de la vache laitière

MS : matière sèche ; UFL : besoins énergétiques pour la production d'1 L de lait.

Les **besoins énergétiques** de la vache laitière évoluent dans le même sens que sa capacité d'ingestion, mais, en début de lactation, cette dernière augmente moins vite que les besoins. La vache est donc inévitablement sous-alimentée en début de lactation et puise alors dans ses réserves corporelles.

Farines animales et alimentation des bovins

Le fourrage ne suffit pas pour les animaux très productifs, comme les vaches laitières. Ceux-ci ont besoin de beaucoup plus de protéines. Elles leur sont apportées habituellement par les pois et les tourteaux de colza et de soja. Ces compléments représentent alors de 20 à 25 % de la ration alimentaire. Cet apport n'est que de 10 % dans les races à viande ou chez les vaches laitières moyennement productives.

L'objectif de l'éleveur est de satisfaire les besoins des animaux, tout en tenant compte de contraintes économiques. Depuis le début du XXe siècle, les farines animales ont été utilisées pour les ruminants à chaque fois qu'elles ont représenté une solution plus économique que les tourteaux de soja et de colza. Leur concentration n'a cependant jamais dépassé 2 à 3 % dans les mélanges industriels distribués en France pour les ruminants.

L'avantage des farines animales est de contenir une plus forte proportion de protéines non dégradées par les micro-organismes du rumen que des aliments concentrés plus classiques. Ces protéines sont alors mieux digérées au niveau intestinal et constituent une source complémentaire d'acides aminés indispensables notamment pour les vaches laitières (lysine et méthionine essentiellement).

Les farines animales (le nom technique est « farines de viande et d'os » ou FVO) sont fabriquées à partir des os et des abats qui n'entrent pas dans l'alimentation humaine, et des animaux morts à la ferme. Les graisses sont séparées par cuisson des os et des restes de viande, puis ces derniers sont réduits en morceaux.

Au début des années 1980, au Royaume-Uni, ces farines ont été fabriquées selon des procédés simplifiés et moins coûteux : la température de cuisson a diminué, des solvants ont été supprimés. Le traitement à haute température éliminait probablement de la chaîne alimentaire le prion, à l'origine de la maladie appelée encéphalopathie spongiforme bovine (ESB). Les premiers cas d'ESB ont été identifiés en 1986 en Grande-Bretagne et l'épidémie dite de la vache folle s'est propagée en Europe par l'exportation des farines animales britanniques. Les premières mesures françaises d'interdiction des farines animales dans l'alimentation des ruminants datent de 1990. L'interdiction a été étendue à tous les animaux d'élevage en 2000.

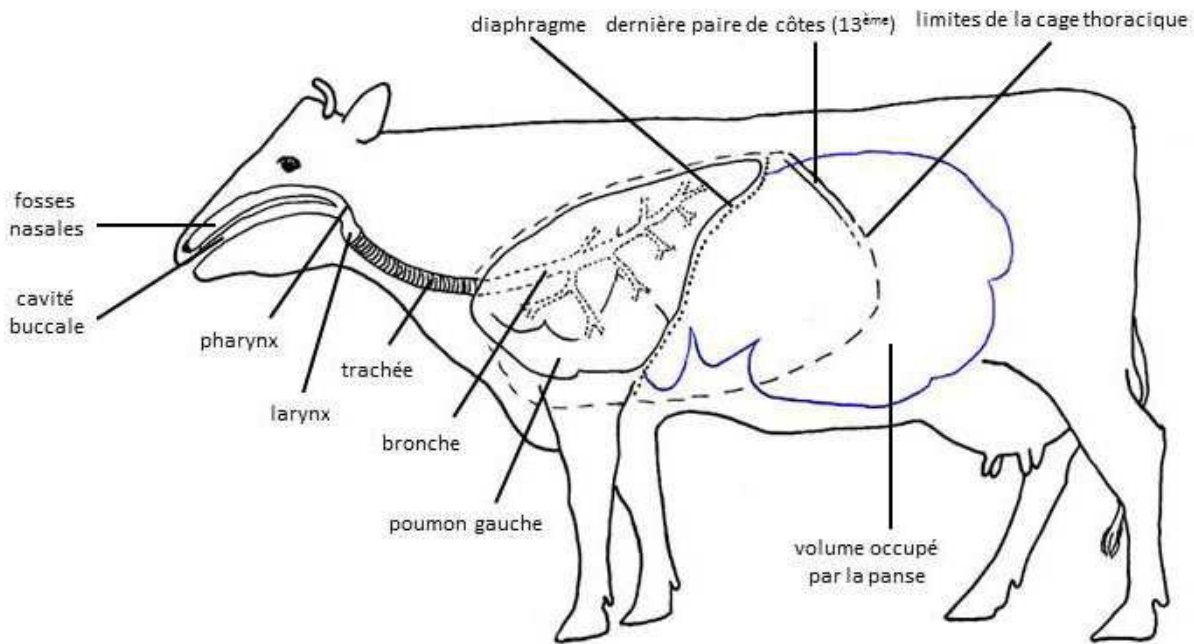
B/ Approvisionnement en dioxygène et élimination du dioxyde de carbone

La **respiration cellulaire** nécessite du dioxygène et produit un déchet, le dioxyde de carbone. L'organisme échange ces gaz avec l'environnement au niveau des poumons. L'appareil respiratoire est constitué des **voies respiratoires** et **des poumons** : son organisation est très similaire chez tous les Mammifères.

1. Trajet de l'air dans les voies respiratoires

L'air entre dans les voies respiratoires au niveau du mufle de la vache, constitué de la fusion des naseaux et de la lèvre supérieure et recouvert d'une muqueuse humide. L'air passe ensuite dans le pharynx, carrefour des voies respiratoires et digestives, le larynx, puis la trachée, maintenue béante par des anneaux de cartilage, et qui se subdivise en deux bronches pénétrant chacune dans un poumon. Dans les poumons, les bronches se ramifient encore en bronches et bronchioles de diamètres décroissants jusqu'aux sacs alvéolaires d'un diamètre d'environ 100 mm.

Le passage de l'air dans les voies respiratoires, dont les cellules épithéliales sécrètent un mucus, permet de le réchauffer, de l'humidifier et de retenir les particules en suspension.



Anatomie de l'appareil respiratoire de la vache, vue latérale gauche.

Les poumons sont réduits du fait de l'encombrement de la panse.

2. Echanges gazeux au niveau des alvéoles pulmonaires

Les poumons sont des organes spongieux et élastiques situés dans le thorax. Chez la vache, le poumon gauche est subdivisé en 3 lobes, le droit en comporte 5.

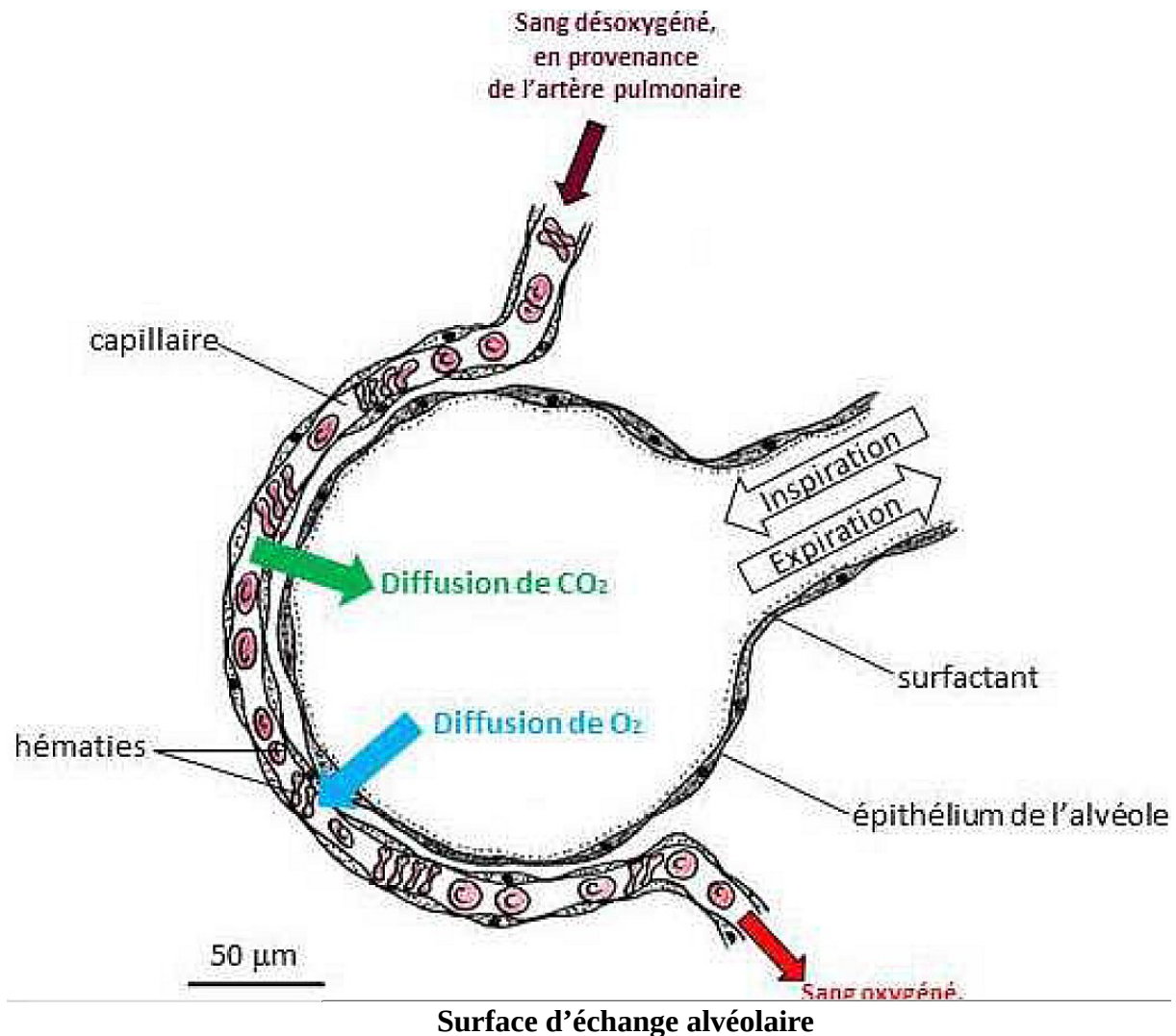
Comme chez tous les Mammifères, on constate que le rapport entre la surface alvéolaire et le volume des poumons est très important. Néanmoins, la comparaison avec d'autres grands herbivores comme le cheval, montre un volume pulmonaire et une surface alvéolaire totale réduits par rapport au volume de l'animal et ses besoins en dioxygène. Cette caractéristique est à mettre en relation avec la réduction du volume disponible pour les organes thoraciques, du fait de grand volume occupé par la panse.

	Vache (700 kg)	Cheval (500 kg)
Masse des poumons / masse du corps (en %)	0,73	1,02
Volume des poumons (en L)	12,4	42,0
Surface alvéolaire / volume des poumons (en cm ² /cm ³)	635	755
Surface alvéolaire totale (en m ²)	316	2457

Caractéristiques comparées des poumons chez la vache et le cheval.

La paroi des **alvéoles** constitue la surface d'échange des gaz respiratoires. Elle est constituée d'une unique couche de cellules très plates, l'épithélium pulmonaire, tapissé sur la face interne d'un film humide, le **surfactant**, qui permet la dissolution des gaz respiratoires et évite le collapsus des parois alvéolaires. De nombreux capillaires sont appliqués contre la lame basale qui entoure les alvéoles. Une épaisseur très fine, de l'ordre de 1 µm, constituée de seulement deux couches de cellules, épithélium des alvéoles et endothélium des capillaires, sépare donc l'air alvéolaire du sang.

Les échanges respiratoires se font par **simple diffusion**, du fait des différences de pressions partielles des gaz de part et d'autre de la surface d'échange.



3. Renouvellement de l'air

Le renouvellement de l'air dans les alvéoles, et la circulation du sang, assurent le maintien des différences de pressions partielles des gaz respiratoires et la poursuite des échanges. La **ventilation pulmonaire** est assurée par l'alternance des inspirations et des expirations. Le rythme des mouvements respiratoires est de 10 à 30 cycles respiratoires par minute chez la vache.

Les poumons suivent passivement les mouvements de la cage thoracique et du diaphragme grâce à la plèvre constituée d'un feuillet externe adhérent à la paroi thoracique, et d'un feuillet interne adhérent au poumon, la respiration est dite costo-abdominale.

Lors de l'**inspiration**, la contraction des muscles intercostaux agrandit la cage thoracique tandis que la contraction du diaphragme refoule les viscères abdominaux, le volume pulmonaire augmente.

Lors de l'**expiration**, les muscles se relâchent : les poumons et la cage thoracique reviennent passivement à leur position initiale.

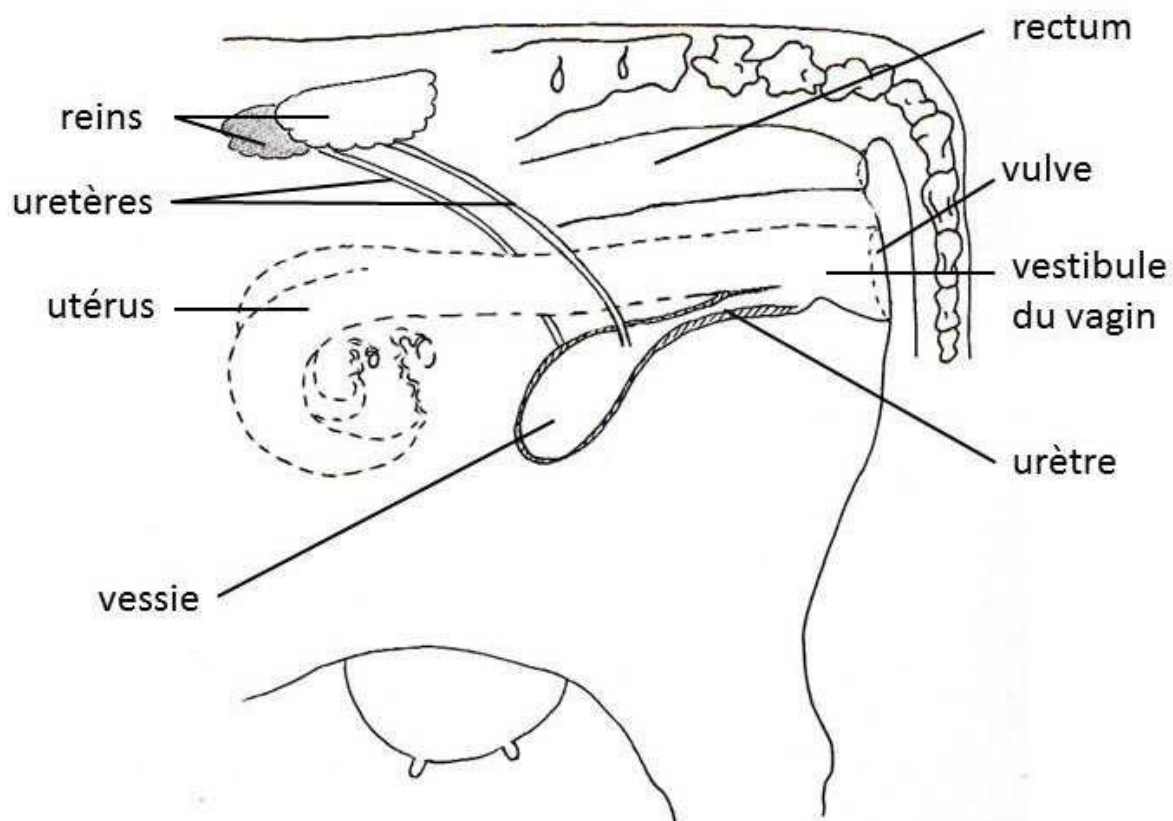
La respiration des bovins est à prédominance abdominale : les mouvements des muscles abdominaux amplifient les mouvements du diaphragme. Le volume d'air entrant ou sortant des poumons à chaque cycle respiratoire de la vache est de l'ordre de 8 L.

L'appareil respiratoire de la vache est adapté à une respiration en milieu aérien : la surface d'échange est invaginée à l'intérieur du corps, ce qui limite les pertes d'eau. La faible viscosité de l'air autorise les mouvements respiratoires bidirectionnels.

C/ Elimination des déchets azotés par l'appareil excréteur

1. Organisation de l'appareil urinaire

Chez la vache, les **reins** sont de forme lobée. Le rein droit est plaqué au plafond de la cavité abdominale tandis que le rein gauche a une position particulière : il est flottant, refoulé à droite par le développement important du rumen.



Appareil uro-génital de la vache

Les organes génitaux sont représentés en pointillés.

Chaque rein est constitué d'environ un million de tubes urinifères ou **néphrons**, qui constituent l'unité structurale et fonctionnelle du rein. L'**urine** produite par les néphrons, regroupés en pyramides, est collectée par le bassinet, conduite par l'uretère à la vessie où elle est stockée, avant d'être rejetée au dehors par l'urètre.

2. Filtration du sang par les reins

Le rein est un organe richement vascularisé, le débit sanguin rénal de la vache est de 4150 L/24h, alors que le volume sanguin total est d'environ 60 L : l'équivalent du volume sanguin est donc filtré toutes les 20 minutes. Une vache de 700 kg émet environ 21 L d'urine par jour.

La comparaison de la composition du plasma sanguin et de l'urine de vache permet de mettre en évidence le rôle du rein.

Constituants essentiels	Plasma	Urine
protéines	67-75 g/L	0
glucose	2,2-5,6 mmol/L	0
Na ⁺	136-144 mmol/L	8-40 mmol/L
K ⁺	3,6-4,9 mmol/L	325 mmol/L
Cl ⁻	99-107 mmol/L	20-80 mmol/L
Urée	3,6-8,9 mmol/L	179-293 mmol/L

Comparaison de quelques composants essentiels du plasma sanguin et de l'urine de vache.

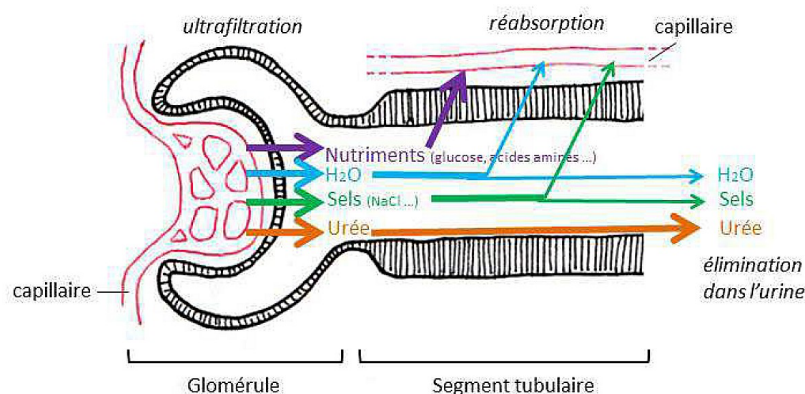
Les protéines et le glucose sont présents dans le plasma mais non dans l'urine, le rein se comporte donc comme une barrière vis-à-vis de ces substances. Les sels minéraux et l'urée sont présents dans le plasma et dans l'urine, à des concentrations différentes. Le rein prélève ces composés de façon sélective et modulée, et les élimine dans l'urine.

- L'urée est un déchet du métabolisme des molécules organiques azotées. En effet, la dégradation des protéines et des acides nucléiques produit des substances azotées telles que l'ammoniac. Chez les Mammifères, le foie synthétise l'urée (CO(NH₂)₂), à partir de l'ammoniac et de dioxyde de carbone. L'urée, très soluble, est libérée dans le sang et filtrée par les reins qui assurent ainsi l'excrétion des déchets azotés. Dans le cas de la vache nous avons vu que de l'urée est aussi sécrétée dans la salive.

- Les concentrations en éléments minéraux des liquides extracellulaires doivent rester stables pour le maintien des structures et des activités des cellules (maintien de la pression osmotique, de la volémie et de l'équilibre acido-basique). En éliminant l'eau et les sels minéraux en excès, les reins participent au maintien de l'équilibre hydrominéral ou osmorégulation.

3. Etapes de la formation de l'urine

Un néphron comporte une unité de filtration, le **glomérule**, prolongé par un **segment tubulaire**. Au niveau du glomérule, la différence de pression avec les capillaires sanguins fait passer l'eau et les solutés du plasma (sels minéraux, glucose, urée) vers la lumière du néphron. Les protéines sanguines restent dans le plasma. Au niveau du segment tubulaire, les solutés sont réabsorbés, soit partiellement (eau et sels minéraux), soit totalement (glucose). D'autres composés peuvent être sécrétés à ce niveau.



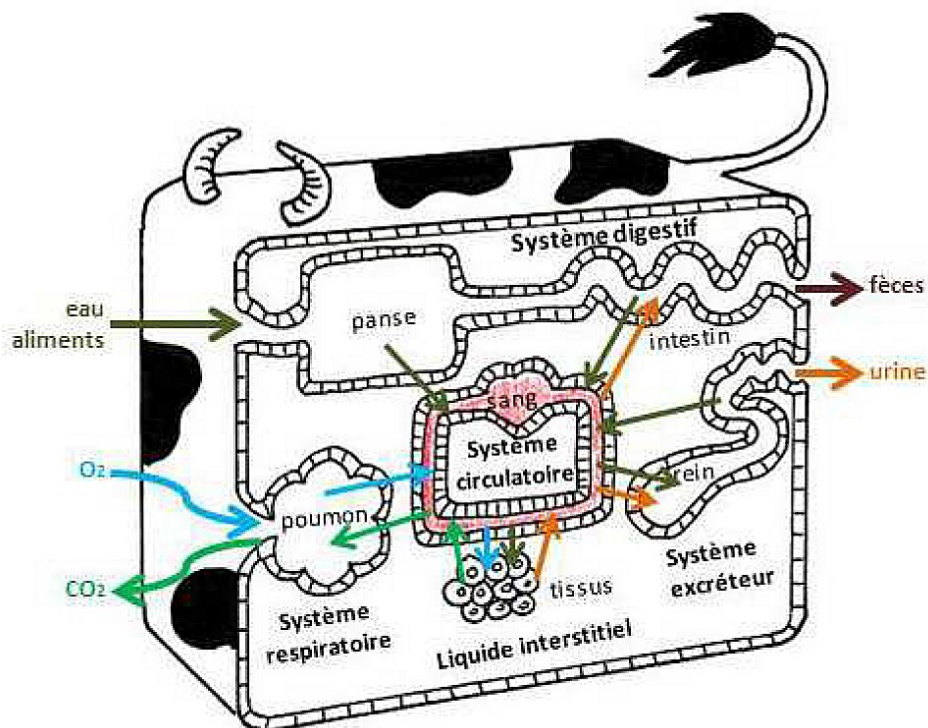
Principe du fonctionnement du néphron

La réabsorption de l'eau est contrôlée hormonalement par l'ADH (Anti Diuretic Hormone) et celle du sodium par l'aldostérone. L'appareil excréteur de la vache est adapté à la vie en milieu aérien, milieu déshydratant : l'urée est très concentrée dans l'urine, ce qui limite les pertes d'eau. Les reins fonctionnent donc sur le principe de l'**ultrafiltration du plasma sanguin**, suivie d'une **réabsorption** de l'eau et de certains solutés, tandis que les déchets sont concentrés et éliminés dans l'urine.

Dans le cas des animaux pluricellulaires comme la vache, les cellules n'ont pas de contacts directs avec l'environnement, ce sont des surfaces d'échanges spécialisées, digestives, respiratoires, excrétrices, qui assurent les échanges avec l'environnement.

Les cellules baignent dans le milieu intérieur, dont les caractéristiques (composition, pH...) sont stables. Cette stabilité du milieu intérieur contraste avec les multiples variations de l'environnement.

Le sang transporte les métabolites, déchets et gaz des cellules aux surfaces d'échanges avec l'extérieur. Les capillaires constituent les surfaces d'échanges entre les cellules et le sang.



Les surfaces d'échanges entre l'organisme vache et l'environnement

Flèches vertes : les aliments ingérés deviennent nutriments par digestion. Flèches orange : déchets