Joseph Segarra
Emmanuel Piètre
Carole Ahyerre
Grégory Bailly
Éric Chauvet
Didier Favre
Maxime Huille
Tanguy Jean
Florence Metz
Céline Proch
Florian Sonthonnax

BCPST
1re année

PRÉPAS SCIENCES

COLLECTION DIRIGÉE PAR **BERTRAND HAUCHECORNE**

BIOLOGIE

2e édition

NOUVEAUX PROGRAMMES

- Cours complet conforme aux objectifs du programme
- Fiches de travaux pratiques intégrées au cours
- Nombreuses illustrations originales en couleurs
- Encarts pour développer l'argumentation et la démarche scientifique
- Techniques de biologie sous forme de fiches

ellipses

PRÉPAS SCIENCES

collection dirigée par ***Bertrand Hauchecorne***

BCPST

1re année

Biologie

2e édition

ouvrage coordonné par

Joseph SEGARRA

Professeur en TB2, Lycée Pierre-Gilles de Gennes – ENCPB, Paris

et **Emmanuel PIÈTRE**

Professeur en BCPST1, Lycée Champollion, Grenoble

Carole AHYERRE
Professeur en BCPST1,
Lycée Montaigne, Bordeaux

Grégory BAILLY
Professeur en Biologie-Écologie,
Campus Agro-environnemental 62, Arras

Éric CHAUVET
Professeur en TB1 et TB2,
Lycée Marie Curie, Marseille

Didier FAVRE
Professeur en TB1 et TB2,
Lycée agricole Théodore Monod, Rennes Le Rheu

Maxime HUILLE
Professeur en BCPST2, Lycée Camille Guérin, Poitiers

Tanguy JEAN
Professeur en BCPST1,
Lycée Chateaubriand, Rennes

Florence METZ
Professeur en BCPST2, Lycée Jean-Baptiste Say, Paris

Céline PROCH
Professeur en BCPST2,
Lycée Léonard Limosin, Limoges

Florian SONTHONNAX
Professeur de Biochimie génie biologique en TB2,
Lycée Pierre-Gilles de Gennes - ENCPB, Paris

ellipses

ISBN 9782340-048607
©Ellipses Édition Marketing S.A., 2023
8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

Un ouvrage conforme au nouveau programme, entièrement pensé pour faire progresser les élèves des classes préparatoires tout au long de l'année

- ***Biologie BCPST 1re année*** est conçu pour accompagner les étudiants des classes préparatoires aux grandes écoles BCPST et TB vers la maîtrise des savoirs et des capacités exigibles du nouveau programme entré en vigueur à la rentrée 2021. Il s'attache particulièrement à prendre en compte l'état d'esprit de ce nouveau programme : une présentation des savoirs articulée avec des capacités relevant autant de compétences techniques et pratiques que de compétences de raisonnement et d'analyse critique des données.

Un ouvrage complet alliant cours, travaux pratiques et analyses de données, complémentaire des enseignements de la classe préparatoire

- Cet ouvrage a vocation à être consulté en complément du cours de classe préparatoire de première année ou au moment des révisions pour le concours. Ce livre présente non seulement les notions et les données qui doivent être connues des étudiants, mais propose aussi des ressources et des clés pour mieux comprendre les mécanismes biologiques. Il s'adresse également aux étudiants de Licence ou aux étudiants préparant les concours de recrutement d'enseignants, à la recherche d'un ouvrage synthétique et pratique.
- Pour chaque partie du programme, l'étudiant trouvera :

– **un cours complet**, **argumenté et explicatif** construit sur des faits et des résultats expérimentaux afin de développer la démarche scientifique et adapté aux besoins d'un étudiant de niveau Licence.
– **des travaux pratiques organisés en fiches thématiques** insérées au début de chaque chapitre. L'objectif est de favoriser une mise en relation la plus directe possible entre les données issues de l'observation ou de l'expérience et la construction des concepts développée dans le cours.
– **des encarts d'analyse de données** présentant des faits d'observation et des résultats expérimentaux. L'objectif est double : d'une part proposer des arguments supports de la démarche explicative développée dans le cours, d'autre part entraîner les étudiants à commenter et interpréter des données scientifiques.
– **des encarts d'approfondissement** pour développer la culture générale de l'étudiant.
– **des fiches de présentation des principales techniques** utilisées couramment en biologie constituant un corpus que l'étudiant doit maitriser pour interpréter les données qui sont proposées à l'analyse dans les épreuves écrites ou orales.

Une présentation claire, rigoureuse et adaptée aux besoins des étudiants

- Pour aider les étudiants à progresser en classe préparatoire et à réussir les concours, l'ouvrage propose :
  - **une iconographie privilégiant les documents photographiques et la référence à des situations de terrain** pour renforcer les connaissances concrètes, le sens de l'observation et préparer aux épreuves de travaux pratiques.
  - **des schémas originaux** pour mieux comprendre les notions abordées, à utiliser pour les épreuves écrites et orales.
  - **une mise en relation des savoirs et des savoir-faire par de nombreux liens** entre chapitres qui contribuent à construire le réseau de connaissances.
  - **une synthèse des connaissances fondamentales et des capacités exigibles** du programme pour aider les étudiants à faire le point sur leurs connaissances. Cette synthèse est accompagnée d'un **schéma-bilan**.

Une équipe d'auteurs parfaitement au fait des attentes des étudiants en classe préparatoire BCPST et TB et des exigences des concours

- Les auteurs de l'ouvrage sont professeurs en classes préparatoires et/ou interrogateurs aux concours de la filière BCPST ou TB. Ils connaissent les exigences de la filière mais aussi les difficultés inhérentes à l'apprentissage de domaines scientifiques nécessitant une prise en compte de différentes échelles spatiales et temporelles. Exploitant leurs différents domaines d'expertise, ils ont eu à cœur de construire des cours fondés sur une démarche scientifique fondamentalement adossée à l'observation des phénomènes naturels.

- *Le programme de sciences de la vie et de la Terre de première et seconde années BCPST est disponible sur le site du Bulletin officiel de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports B.O. n° 26 du 1er juillet 2021*
  https ://www.education.gouv.fr/bo/21/Hebdo26/ESRH2108111A.htm

- *Le programme de sciences de la vie et de la Terre de première et seconde années TB est disponible sur le site du Bulletin officiel de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports B.O. n° 30 du 29 juillet 2021*
  https ://www.education.gouv.fr/bo/21/Hebdo30/ESRS2111618A.htm

Sommaire

Partie A
L'organisme vivant en lien avec son environnement 11

Chapitre 1
Regards sur un organisme métazoaire : un Bovidé 13

Chapitre 2
Organisation fonctionnelle des Métazoaires : relations entre fonctions, milieux de vie et organismes 61

Chapitre 3
Regard sur un organisme angiosperme : une Fabacée 145

Partie B
Interactions entre les organismes et leur milieu de vie 187

Chapitre 4
La respiration : une fonction en interaction directe avec le milieu 189

Chapitre 5
Nutrition des Angiospermes en relation avec le milieu 239

Partie C
La cellule dans son environnement 285

Chapitre 6
Les cellules au sein d'un organisme 287

Chapitre 7
Organisation fonctionnelle de la cellule 315

Chapitre 8
Membranes et échanges membranaires 355

Partie D
Organisation fonctionnelle des molécules du vivant 389

Chapitre 9
Les constituants du vivant 391

Chapitre 10
Les lipides 413

Chapitre 11
Oses et polyosides 435

Chapitre 12
Nucléotides et acides nucléiques 463

Chapitre 13
Acides aminés et protéines 485

Partie E
Le métabolisme cellulaire 537

Chapitre 14
Les enzymes et la catalyse des réactions 539

Chapitre 15
L'approvisionnement en matière organique 587

Chapitre 16
Devenir de la matière organique 645

Partie F
Génomique structurale et fonctionnelle 701

Chapitre 17
Les génomes des cellules et des virus 703

Chapitre 18
La transmission de l'information génétique au cours des divisions cellulaires chez les Eucaryotes 753

Chapitre 19
L'expression du génome 785

Chapitre 20
Le contrôle de l'expression du génome 827

Partie J
Populations et écosystèmes 857

Chapitre 21
Les populations et leur démographie 859

Chapitre 22
Organisation des écosystèmes et diversité des relations interspécifiques 891

Chapitre 23
Le fonctionnement des écosystèmes 963

Chapitre 24
La dynamique des écosystèmes 997

Partie K
Évolution et phylogénie 1027

Chapitre 25
Classer la biodiversité 1029

Fiches techniques 1077

Index 1109

Quelques grandeurs, unités et constantes utiles en biologie

Unités de bases du système international

Grandeur physique	Unité du système international
longueur	m (mètre)
masse	kg (kilogramme)
temps	s (seconde)
intensité électrique	A (ampère)
température	K (kelvin)
quantité de matière	mol (mole)
intensité lumineuse	cd (candela)

Unités du système international dérivées cohérentes et unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

Grandeur physique	Expression en unités du système international	Unités particulières ou unités usuelles
accélération	$m.s^{-2}$	
capacité thermique massique		$J.kg^{-1}.K^{-1}$
charge électrique	s.A	C (coulomb)
concentration molaire	$mol.m^{-3}$	1 $mol.L^{-1}$ = 1 M (molaire)
concentration massique	$kg.m^{-3}$	
concentration osmolaire (osmolarité) *L'osmolarité est la concentration moléculaire qui tient compte des molécules dissociables dans le solvant*		$osm.L^{-1}$ ou $osmol.L^{-1}$ *1 osm = 1 mol si le corps est neutre,* *1 osm = nombre d'entités dissociées x nombre de moles*
conductance électrique		S (siemens) 1 S = 1 A/V
débit	$m^3.s^{-1}$	$L.min^{-1}$
différence de potentiel électrique ou force électromotrice		V (volt)
éclairement lumineux	$m^{-2}.cd$	lx (lux)
énergie, travail, quantité de chaleur	$m^2.kg.s^{-2}$	J (joule) 1 J = 1 N.m
enthalpie libre (G)		J (joule)
force	$m.kg.s^{-2}$	N (newton)
fréquence	s^{-1}	Hz (hertz)
indice de réfraction (n)		grandeur sans dimension
masse molaire (atomique ou moléculaire)		$g.mol^{-1}$

Grandeur physique	Expression en unités du système international	Unités particulières ou unités usuelles
masse moléculaire (*m*, masse d'une molécule)		Da (dalton) 1 Da = 1/12 de la masse d'un atome de ^{12}C masse d'une molécule (ou masse molaire divisée par le nombre d'Avogradro)
masse volumique		$kg.m^{-3}$ (kilogramme par mètre cube)
poids moléculaire ou masse moléculaire relative (Mr, PM ou MW)		sans unité puisqu'il s'agit du rapport de la masse d'une molécule sur la masse de 1/12 de l'atome de ^{12}C
potentiel chimique (μ, identifié à l'enthalpie libre molaire)		$J.mol^{-1}$
pression	$m^{-1}.kg.s^{-2}$	Pa (pascal) *autres unités :* *1 bar =10^5 Pa* *1 mm Hg = 133 Pa*
puissance, flux énergétique		W (watt) 1 W = 1 $J.s^{-1}$
résistance électrique		Ω (ohm)
superficie	m^2	
température	K	°C (degré Celsius) ($T_{(°C)} = T_{(K)} - 273,15$)
viscosité dynamique (η)		Pa.s Poiseuille, 1 Pl=1 Pa.s
vitesse	$m.s^{-1}$	
volume	m^3	L (litre) 1 L = 0,001 m^3

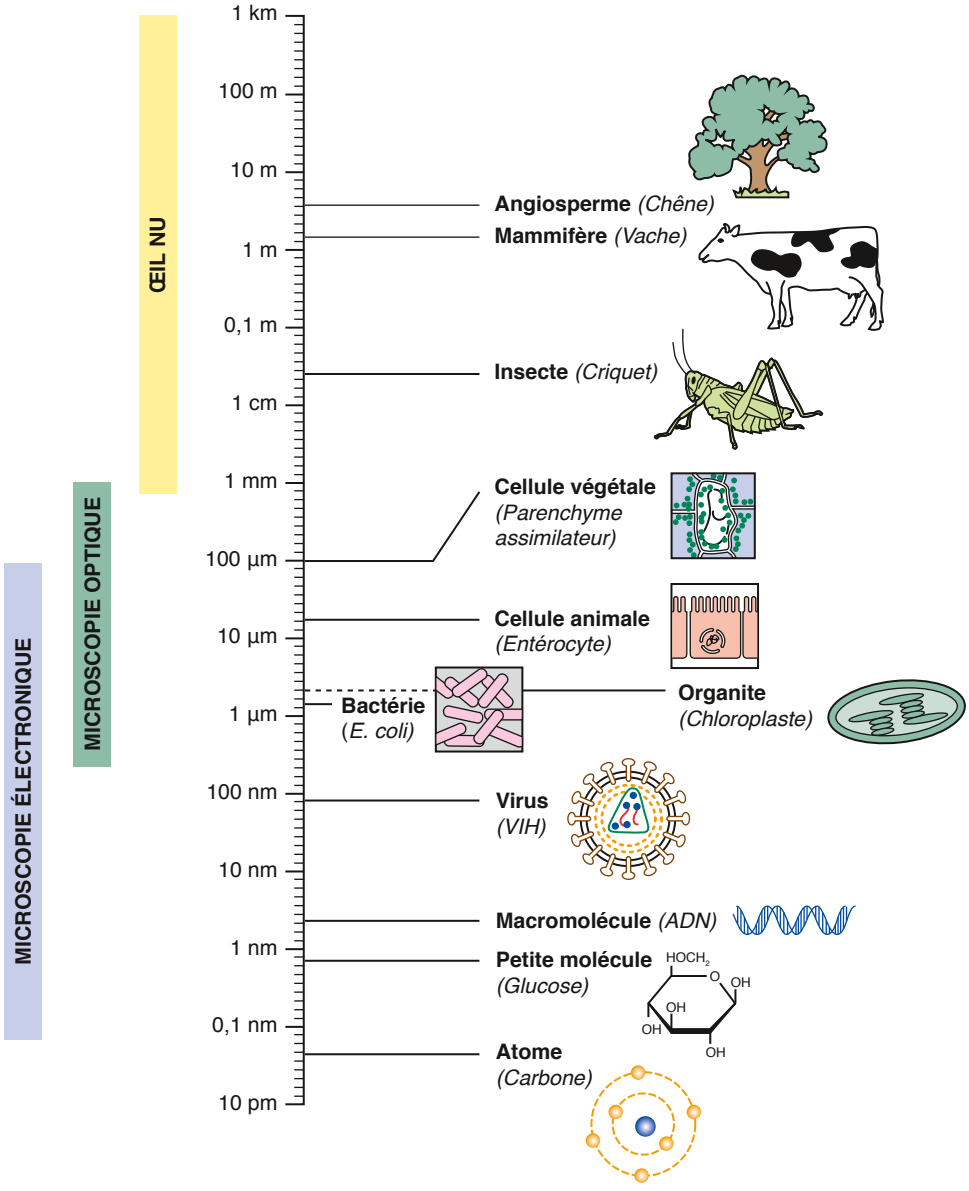
Quelques constantes universelles

Nom	Symbole	Valeur
constante de Faraday	F	96 485 $C.mol^{-1}$
constante des gaz parfaits	R	8,314 $J.mol^{-1}.K^{-1}$
constante de Planck	h	$6,626.10^{-34}$ J.s
constante universelle de gravitation	G	$6,673.10^{-11}$ $m^3.kg^{-1}.s^{-2}$
nombre d'Avogadro	N_A ou $\mathcal{N}$	$6,022.10^{23}$ mol^{-1}
vitesse de la lumière dans le vide	c	$2,998.10^8$ $m.s^{-1}$

Rappel des puissances

Multiplicateur	Préfixe	Symbole	Multiplicateur	Préfixe	Symbole
10^{12}	tera	T	10^{-2}	centi	c
10^9	giga	G	10^{-3}	milli	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	µ
10^3	kilo	k	10^{-9}	nano	n
10	deca	da	10^{-12}	pico	p

Les échelles du vivant



Partie A

L'organisme vivant en lien avec son environnement

1

Savoirs et capacités exigibles

Les vaches appartiennent au groupe des Métazoaires et à la famille des Bovidés.
Les différents appareils de l'organisme sont reliés aux fonctions de nutrition, reproduction et relation.
Certaines de leurs caractéristiques sont liées au milieu de vie.
La compartimentation de l'appareil digestif permet l'ingestion d'aliments (hétérotrophie), leur simplification en nutriments et leur absorption, ainsi que l'égestion de la matière non absorbée.
Le microbiote du rumen par son action joue un rôle majeur dans l'origine des nutriments utilisés par la vache.
Les nutriments sont distribués dans l'ensemble de l'organisme par l'appareil circulatoire et entrent ainsi dans le métabolisme cellulaire.
L'appareil respiratoire assure les échanges gazeux liés au métabolisme énergétique aérobie.
L'appareil excréteur élimine les déchets azotés et contribue à l'équilibre hydrominéral de l'organisme.

- Identifier les principaux caractères morphologiques et anatomiques pour positionner une vache au sein d'une classification phylogénétique des Métazoaires.
- Construire un schéma fonctionnel synthétique des appareils impliqués dans la fonction de nutrition.
- Argumenter la complémentarité et la coopération fonctionnelle des différents appareils.
- Metter en relation l'organisation structurale et fonctionnelle de différents appareils et l'adaptation de l'organisme au milieu aérien.

L'appareil reproducteur est le lieu de production des gamètes (méiose et différenciation) et de sécrétion d'hormones. C'est également le lieu de la fécondation et de la gestation dans l'organisme maternel.
La reproduction sexuée est un processus conservatoire et diversificateur. Elle génère des individus qui sont de la même espèce que les parents, mais dont la diversité permet la sélection.

- Repérer au cours de la reproduction sexuée les moments et les modalités de diversification des génotypes.

L'organisme est en interaction avec son environnement biotique et abiotique.
La vache est incluse dans différents systèmes de relations intraspécifiques et interspécifiques (dont les relations avec l'être humain responsable de la domestication des animaux d'élevage).
Les relations interspécifiques avec les microorganismes définissent l'organisme comme un holobionte.
Les végétaux sont des producteurs primaires et constituent des ressources alimentaires à la base des réseaux trophiques. Leur importance dans les agroécosystèmes conduit à la sélection par l'être humain en relation avec la diversification des usages.

- Différencier et illustrer les différents types de relations interspécifiques impliquant la vache.

La survie individuelle des organismes dépend de leur percéption du milieu et de leur capacité de réaction et/ou de leurs systèmes de protection.
Les informations perçues par les récepteurs sensoriels sont intégrées au niveau du système nerveux central qui élabore des réponses. Le déplacement de l'animal suite à la perception d'un stimulus met en jeu son squelette et les muscles striés associés.
Le tégument joue un rôle d'isolant thermique et de barrière contre les agents pathogènes et les parasites. Face aux variations d'origine interne ou externe, les interrelations entre fonctions permettent une réponse de l'organisme.
Une boucle de régulation permet le retour à une valeur de consigne d'un paramètre physiologique suite à la détection de ses variations par des récepteurs, au traitement et à l'intégration de l'information conduisant à une réponse coordonnée liée à des effets sur des organes cibles (effecteurs).

- Identifier les principales étapes menant de la perception d'une variation de paramètre physico-chimique du milieu à la mobilité de l'organisme

Regards sur un organisme métazoaire : un Bovidé

Introduction

- Les organismes vivants sont caractérisés par leurs capacités :
  - à se maintenir en vie en **échangeant avec l'environnement de la matière et de l'énergie**. Ils réalisent ainsi des conversions énergétiques leur permettant de se maintenir dans un état stationnaire de non-équilibre : ils maintiennent constants leur organisation générale, 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 et des caractéristiques structurales similaires y sont regroupées en **tissus** (exemple : les cellules de l'épithélium intestinal), différents tissus assurant une fonction commune sont assemblés en **organes** (exemple : épithélium intestinal, tissu conjonctif et tissu musculaire constituant l'intestin grêle). Différents organes concourant à la même fonction constituent un **appareil** ou système (exemple : l'appareil digestif). Différents types d'organes et d'appareils accomplissent des fonctions distinctes mais corrélées entre elles au sein de l'organisme.
- Les grandes fonctions qui caractérisent les animaux 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 formation de nouveaux individus : elle est assurée par l'appareil reproducteur ;
  - les fonctions de **relation** qui permettent d'enregistrer les variations du milieu extérieur, de réagir à ces variations et de se déplacer dans ce milieu. Ces fonctions sont assurées par les systèmes nerveux, endocrinien, musculaire, osseux, tégumentaire et immunitaire.

Les mêmes fonctions biologiques, réalisées de manières différentes, sont retrouvées chez tous les organismes.

- Les matériaux et l'énergie nécessaires à la réalisation de ces grandes fonctions biologiques proviennent des aliments : les animaux sont des organismes **hétérotrophes**.
- 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.

Quels sont l'organisation et le fonctionnement chez la vache des systèmes accomplissant les grandes fonctions caractéristiques d'un organisme animal ? Quelles sont les interrelations entre ces fonctions ? Quelle est leur dimension adaptative et évolutive ?

Sommaire

1. L'organisme animal se maintient en vie en échangeant de l'énergie et de la matière avec son environnement 16

1.1. Prélèvement des nutriments nécessaires à l'organisme par l'appareil digestif 16
1.2. Approvisionnement en dioxygène et élimination du dioxyde de carbone par l'appareil respiratoire 27
1.3. Élimination des déchets azotés par l'appareil excréteur 29
1.4. L'appareil circulatoire assure la distribution des nutriments à l'ensemble de l'organisme 31

2. L'organisme animal est capable de se reproduire 34

2.1. Les appareils génitaux mâle et femelle produisent les gamètes 34
2.2. Rencontre des gamètes et développement de l'embryon dans les voies génitales femelles 36
2.3. Naissance et alimentation lactée du veau 38
2.4. Une reproduction des Bovins d'élevage maîtrisée par l'Homme 40

3. L'organisme animal interagit avec l'environnement : il perçoit des stimuli externes, se déplace et se protège 45

3.1. La vache est un animal grégaire 45
3.2. La vache perçoit son environnement et y réagit 46
3.3. Le tégument est une surface de protection 52
3.4. Les paramètres du milieu intérieur sont régulés 53

Schéma-bilan 59

Encart 1.1 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 bœuf est un mâle adulte âgé de plus de 24 mois, castré.

➤ *Chapitre 25 (1.3.1.1) : nomenclature des taxons*

La nomenclature des noms scientifiques a été formalisée par Linné au XVIIIe siècle.
Le nom scientifique d'une espèce est formé de la combinaison de deux mots, le premier étant appelé nom de genre et le second nom d'espèce. Le premier doit prendre une majuscule ; le second doit commencer par une minuscule.

Encart 1.2 La vache française en quelques chiffres

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 1 700 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.



Figure encart 1.2
Différentes races bovines

A. Une race laitière : la vache Prim'Holstein (cliché P. Ganault).
B. Une race à viande : la vache charolaise (cliché A. Bonnot).

On désignera dans la suite sous le terme « vache » un Bovin domestique âgé de plus de 24 mois.

1. L'ORGANISME ANIMAL SE MAINTIENT EN VIE EN ÉCHANGEANT DE L'ÉNERGIE ET DE LA MATIÈRE AVEC SON ENVIRONNEMENT

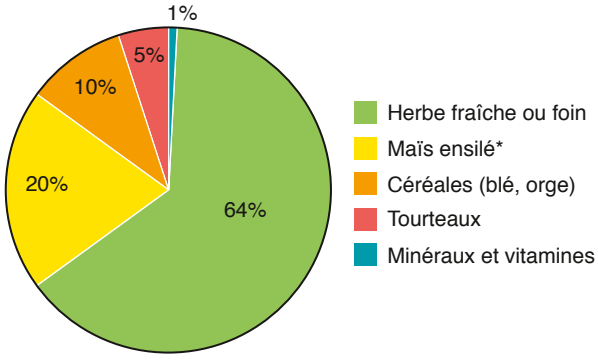
Les aliments apportent la matière organique nécessaire à la production de nouveaux tissus, leur régénération, ainsi que pour la reproduction. Ils constituent aussi une source d'énergie pour toutes les activités de l'organisme.

1.1. PRÉLÈVEMENT DES NUTRIMENTS NÉCESSAIRES À L'ORGANISME PAR L'APPAREIL DIGESTIF

1.1.1. 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 fourrage ensilé 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) (figure 1.1).

Figure 1.1
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).

Encart 1.3

Le fourrage correspond à un végétal ou un mélange de végétaux utilisés pour l'alimentation des animaux d'élevage. Il est constitué essentiellement des parties aériennes des plantes.
Le foin est un fourrage constitué de plantes herbacées fauchées et séchées.
Un fourrage ensilé est un fourrage humide conservé dans des conditions anaérobies et soumis à une fermentation lactique.

Les tissus végétaux sont caractérisés par une relative pauvreté des molécules protéiques et lipidiques par rapport aux composés glucidiques et une **abondance en polymères glucidiques complexes** (cellulose, hémicellulose, pectines) et en lignine, **pour lesquels la vache ne possède pas d'enzymes digestives**. Ces molécules constituent les fibres alimentaires.

➤ *Chapitre 11 (2.2.1) : polyosides structuraux végétaux*

1.1.2. Particularités anatomiques de l'appareil digestif de la vache

1.1.2.1. Les mâchoires et la denture de la vache sont adaptées à une alimentation phytophage (figures 1.2 et 1.3)

- 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.

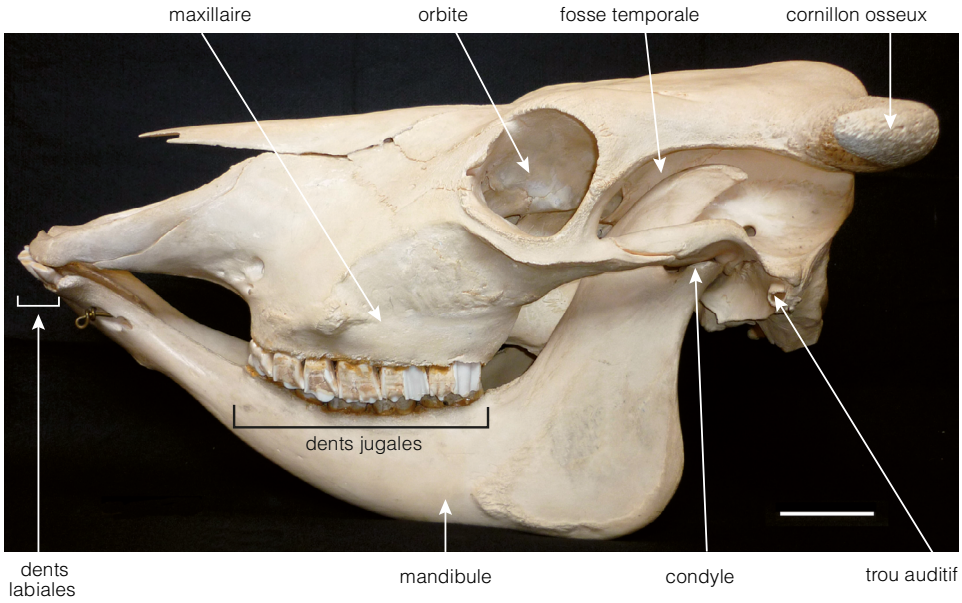
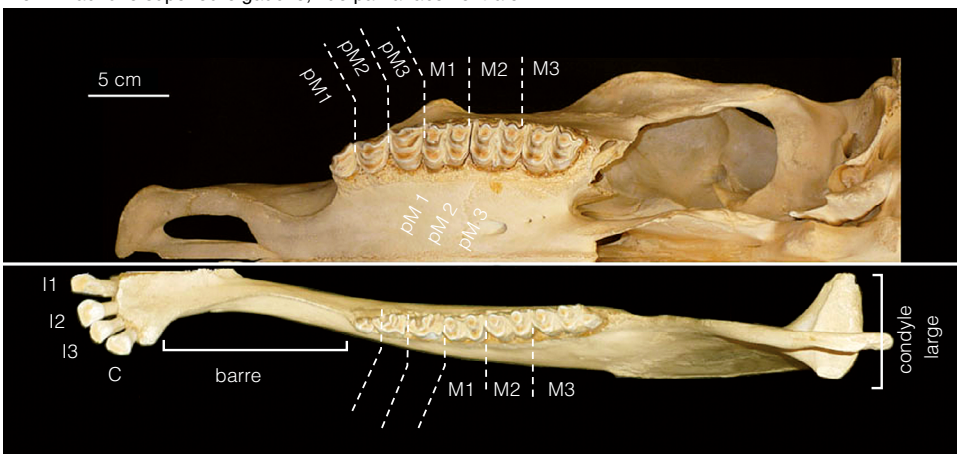


Figure 1.2
Tête osseuse de la vache

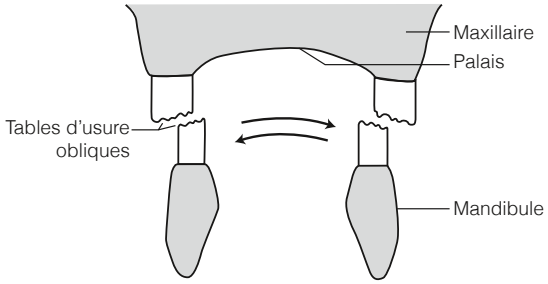
Figure 1.3
Denture de la vache



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 (figure 1.4).

Figure 1.4
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** (**rumination**). La vache pâture préférentiellement à l'aube et au crépuscule, alors que la rumination est essentiellement nocturne.

1.1.2.2. La partie antérieure du tube digestif de la vache, de la cavité buccale à l'estomac, est particulièrement développée (figure 1.5)

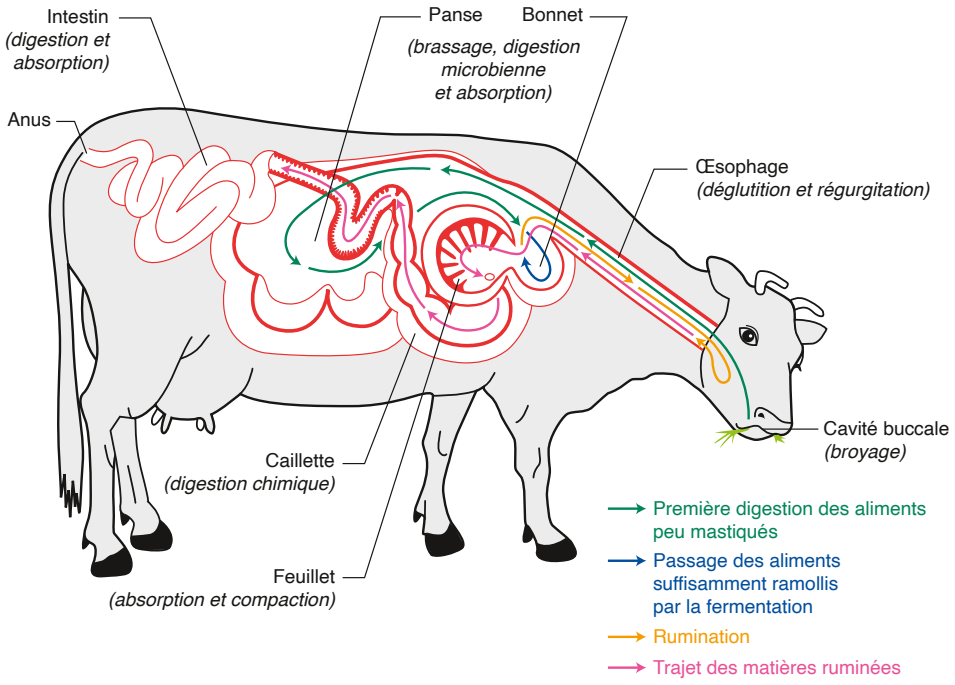


Figure 1.5
Anatomie du tube digestif de la vache et trajet des aliments lors de la rumination

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** (figure 1.6).

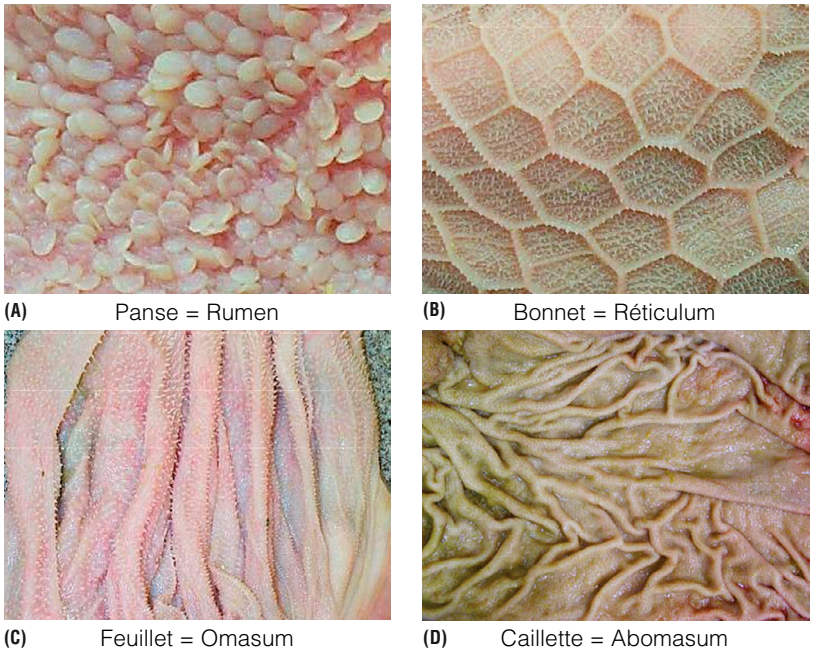
La panse et le bonnet se distinguent par l'aspect de leur épithélium mais forment un volume en continuité par un large orifice. L'ensemble formé de la panse et du bonnet communique avec le feuillet qui lui-même est en contact avec la caillette. La structure histologique de la paroi montre que seule la caillette est homologue d'un estomac de monogastrique, les trois compartiments précédents correspondent à une dilatation de la partie terminale de l'œsophage, ils sont entourés d'une forte musculature qui permet le brassage.

Un épithélium est un tissu formé de cellules jointives, reposant sur une lame basale, au contact du milieu extérieur.

Un sphincter est un muscle lisse circulaire qui ferme un orifice quand il est contracté.

➤ *Chapitre 6 (1.1.3) : épithélium intestinal*

Figure 1.6
Aspect de l'épithélium des différentes cavités de « l'estomac » de la vache



(A) La panse ou rumen, de très grand volume (125 L), a un épithélium composé de papilles.
(B) Le bonnet a un épithélium à structure hexagonale en nids d'abeille formant un réseau.
(C) Le feuillet, contient une centaine de lames en forme de feuilles.
Les papilles de la paroi du rumen et les replis de la paroi du feuillet constituent de vastes surfaces d'échanges.
(D) L'épithélium de la caillette est le seul des quatre cavités à posséder des glandes digestives caractéristiques de l'estomac, sécrétant de l'acide chlorhydrique et du pepsinogène : seule la caillette est homologue d'un estomac d'animal monogastrique. La caillette est fermée postérieurement par le sphincter du pylore.
D'après [http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/herbivores/rumen_anat.html].

Tableau 1.1
Caractéristiques et fonctions des différents segments du tube digestif de la vache

	Segments du tube digestif		Proportions relatives en % du volume total	Fonction	Substances absorbées
Partie antérieure du tube digestif	Cavité buccale			Broyage des aliments Sécrétion d'urée	
	Œsophage			Déglutition, régurgitation	
	« Estomac »	Panse = Rumen	71 %	Digestion par l'activité des micro-organismes Brassage Eructation Absorption	Acides gras volatils
		Bonnet			
		Feuillet		Compression du bol alimentaire Absorption	Eau, acides gras volatils, ions minéraux
		Caillette		Digestion par hydrolases gastriques	

	Segments du tube digestif	Proportions relatives en % du volume total	Fonction	Substances absorbées
Partie postérieure du tube disgestif	Intestin grêle	18 %	Digestion par hydrolases pancréatiques et intestinales Absorption	Eau, oses, acides aminés, acides gras, nucléotides
	Gros intestin	11 %	Digestion par l'activité des micro-organismes Absorption Stockage des fèces	Acides gras volatils Eau, ions minéraux

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

Premières transformations des aliments dans la panse

➤ *BCPST2 (chapitre 1) : organismes unicellulaires*

➤ *Chapitre 14 (2.1) : notion d'enzyme*

La nourriture végétale, avalée sans être mastiquée, passe d'abord dans l'ensemble formé de la panse et du bonnet 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). 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 (tableau 1.2).

Tableau 1.2
Flore microbienne du rumen

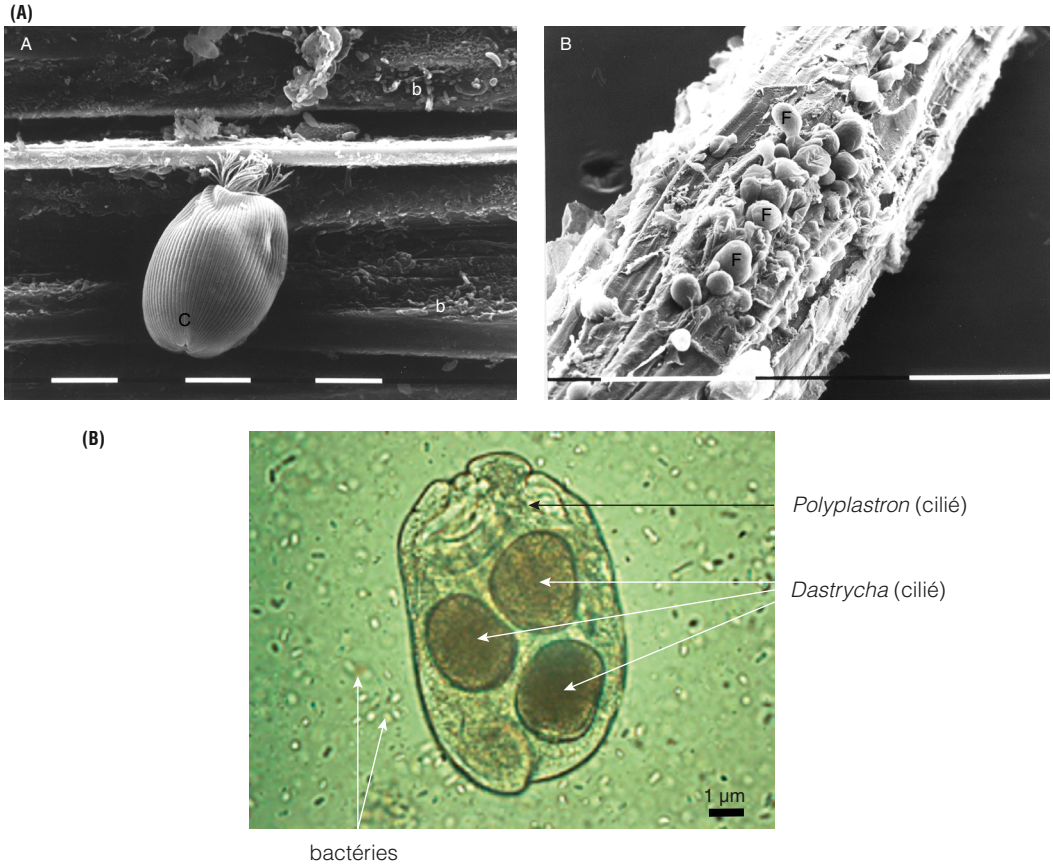
	Abondance	Quelques espèces	Molécules hydrolysées
Bactéries	10^9 à 10^{10}/mL de jus de rumen 1 kg de bactéries chez un Bovin	*Bacteroides succinogenes* *Ruminococcus albus* *Ruminococcus flavefaciens* *Butyrivibrio fibrisolvens*	Cellulose
		Bacteroides ruminicola *Butyrivibrio fibrisolvens*	Hémi-celluloses Protéines
		Bacteroides amylophilus *Streptococcus bovis* *Bacteroides ruminicola*	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		Lignine et fibres indigestibles par les autres micro-organismes

Les bactéries sont des cellules procaryotes, sans noyau.

Les Ciliés sont des eucaryotes unicellulaires caractérisés par la présence, à leur surface, de nombreux cils vibratiles.

Les champignons sont des cellules eucaryotes hétérotrophes dotées d'une paroi de chitine.

Figure 1.7
Microorganismes du rumen de la vache



(A) A. Cilié *Endodinium simplex* associé à des bactéries sur des fibres végétales. B. Champignon *Sphaeromonas communis* colonisant une fibre végétale. Les structures en forme de massue sont des sporanges ancrés par des rhizoïdes sur la fibre végétale. C : cilié ; b : bactéries ; F : sporanges de *S. communis*
Chaque trait blanc ou noir correspond à une longueur de 10 µm.
Clichés aimablement communiqués par Brigitte Gaillard-Martinie, INRA Centre de Recherches de Clermont-Ferrand.
(B) Un cilié du genre *Polyplastron* ayant phagocyté trois ciliés du genre *Dastrycha*, observé au microscope optique.

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 digérés. 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 (CO_2), du méthane (CH_4) et de l'ammoniac (NH_3). D'autre part, les bactéries possèdent des enzymes permettant la détoxification des alcaloïdes formés par les plantes.

➤ *Chapitre 16 (1.1.6) : principe de la fermentation*

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^+, HCO_3^-), 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 d'autres Ciliés et les bactéries de la panse qu'ils phagocytent** (figure 1.7). Ils joueraient ainsi un rôle régulateur vis-à-vis de la flore bactérienne du rumen.

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** (1 000 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 du contenu de la panse et du bonnet passent dans le feuillet. 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 ciliés par jour, qui constituent un apport protéique d'au moins 100 g par jour.

Un écosystème est l'ensemble formé par une association d'organismes vivants (= biocénose) et par son milieu environnant (= biotope). Un écosystème fonctionne comme une unité intégrée au sein de laquelle s'établissent des relations trophiques entre les êtres vivants qui le composent. Il s'y échange ainsi de l'énergie et de la matière permettant le maintien de la vie.

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

Une symbiose est une association durable d'organismes à bénéfices réciproques.

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 les fibres végétales et produisent des molécules utilisées par la vache.
La paroi du rumen constitue une surface d'absorption digestive qui n'existe pas chez les Mammifères non ruminants.

1.1.4. 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 exocrine** sécrète le suc pancréatique. Il contient de **nombreuses enzymes digestives** : l'α-amylase, des protéases diverses (trypsine, chymotrypsine), 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.

➤ *Chapitre 14 (2.3.1) : réaction catalysée par la chymotrypsine*

Dans la nomenclature actuelle, le terme « conduit » fait référence à une structure de type tuyau, possédant sa propre paroi (exemple : conduit déférent, conduit cholédoque). Le terme « canal » désigne quant à lui un orifice qui permet le passage d'une structure anatomique ; le plus souvent ce terme est réservé pour les orifices du crâne ou à travers des os (exemple : canal optique, canal vertébral).

Nomina Anatomica Veterinaria, 5e édition, 2012

Les entérocytes sont les cellules absorbantes de l'épithélium de l'intestin grêle.

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

➤ *Chapitre 6 (1.1.3) épithélium intestinal*

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**.

Chez les hétérotrophes au carbone, les nutriments sont des molécules d'origine alimentaire pouvant être absorbées telles quelles dans l'organisme et pouvant être directement utilisées par les cellules. Ce sont les oses, les acides aminés, les acides gras, les nucléotides, les vitamines, les sels minéraux et l'eau. Les gaz respiratoires ne sont pas des nutriments.

Encart 1.4 Particularités des enzymes digestives de la vache

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 multiplient 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 multiplient 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 4 300 m^2, ce qui constitue une énorme surface d'échange.
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 nutriments constituent la **source d'énergie** pour l'organisme et sont les **précurseurs pour les synthèses**. Ainsi, les animaux sont des chimio-organotrophes : ils tirent leur énergie

➤ *Chapitre 6 (1.1.3) épithélium intestinal*

➤ *Chapitre 8 (2.3.2.3) : échanges membranaires au niveau de l'entérocyte*

des molécules organiques, en les oxydant, et ils en utilisent les constituants comme source de matière pour réaliser leurs synthèses.
Les muscles lisses de la paroi de l'intestin assurent par leurs **contractions péristaltiques** la progression du contenu de l'intestin.

1.1.5. 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 l'**égestion**.
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. La bouse représente aussi une ressource nutritive et un lieu de ponte pour de nombreux insectes (ex. : bousiers)

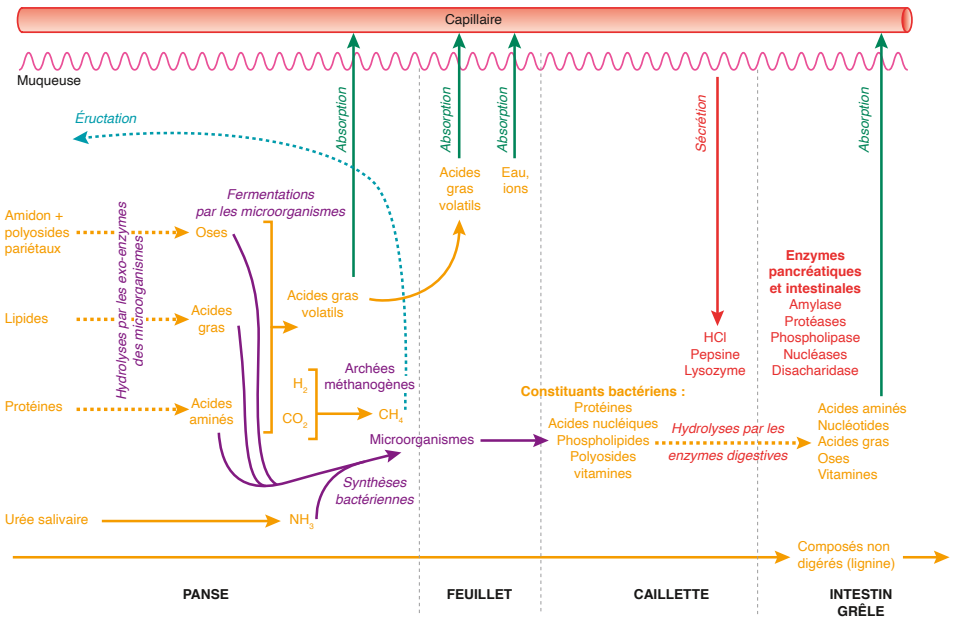


Figure 1.8
Schéma bilan de la digestion des aliments et de l'absorption des nutriments dans le tube digestif de la vache

1.2. APPROVISIONNEMENT EN DIOXYGÈNE ET ÉLIMINATION DU DIOXYDE DE CARBONE PAR L'APPAREIL RESPIRATOIRE

➤ *Chapitre 4 (2.2.1) : vaste surface invaginée et irriguée des poumons des Mammifères*

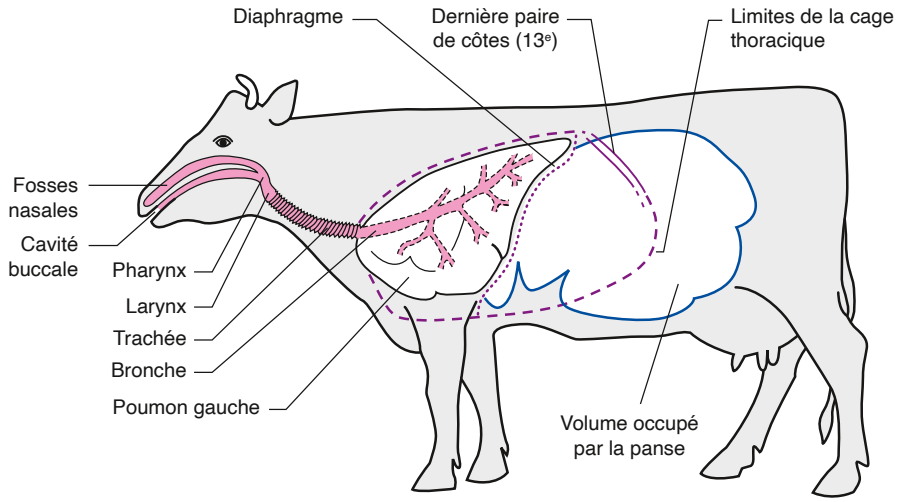
La **respiration cellulaire** nécessite du dioxygène et produit un déchet, le dioxyde de carbone. L'organisme échange ces gaz avec l'environnement au niveau des poumons. L'appareil respiratoire est constitué des **voies respiratoires** et **des poumons** : son organisation est très similaire chez tous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

1.2.1. 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 (figure 1.9). 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 µm.

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.

Figure 1.9
Anatomie de l'appareil respiratoire de la vache, vue latérale gauche



Les voies respiratoires sont indiquées en rose. Les structures impliquées dans la ventilation (diaphragme, cage thoracique) sont indiquées en violet.

1.2.2. Échanges 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 (tableau 1.3). 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.

Tableau 1.3
Caractéristiques comparées des poumons chez la vache et le cheval

	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

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 au contact de l'air alvéolaire 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.

➤ *Chapitre 4 (2.2.1.2) : barrière alvéolo-capillaire*

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.

1.2.3. 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 adhérant à la paroi thoracique, et d'un feuillet interne adhérant au poumon, la respiration est dite costo-abdominale.
Lors de l'**inspiration**, la contraction des muscles inter-costaux 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 présence de structures de soutien (anneaux de cartilage de la trachée, côtes solidaires des poumons) répondent au caractère peu porteur du milieu aérien. La faible viscosité de l'air autorise les mouvements respiratoires bidirectionnels.

1.3. ÉLIMINATION DES DÉCHETS AZOTÉS PAR L'APPAREIL EXCRÉTEUR

1.3.1. Organisation de l'appareil urinaire

Chez la vache, les **reins** sont de forme lobée et localisés au plafond de la cavité abdominale.

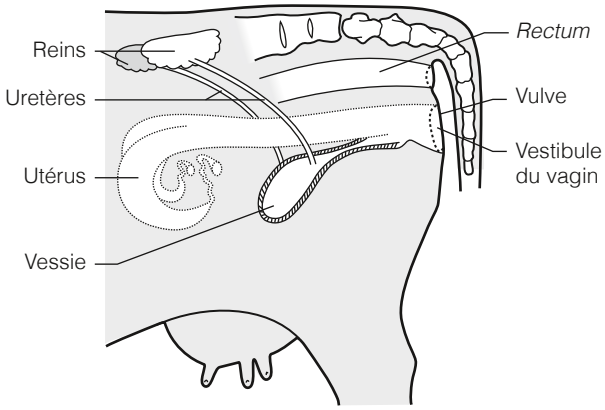


Figure 1.10
Appareil urinaire de la vache

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 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 (figure 1.10).

1.3.2. Filtration du sang par les reins

Le rein est un organe richement vascularisé, le débit sanguin rénal de la vache est de 4 150 L/24 h, 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 (tableau 1.4).

Tableau 1.4
Comparaison de quelques composants essentiels du plasma sanguin et de l'urine de vache

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

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 ($CO(NH_2)_2$), 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.

➤ *Même chapitre (1.1.3) : urée et salive*

– Les concentrations en éléments minéraux des liquides extra-cellulaires 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 hydro-minéral ou **osmorégulation**.

1.3.3. Étapes de la formation de l'urine

Un néphron comporte une unité de filtration, le **glomérule**, prolongée par un **segment tubulaire** (figure 1.11).
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.

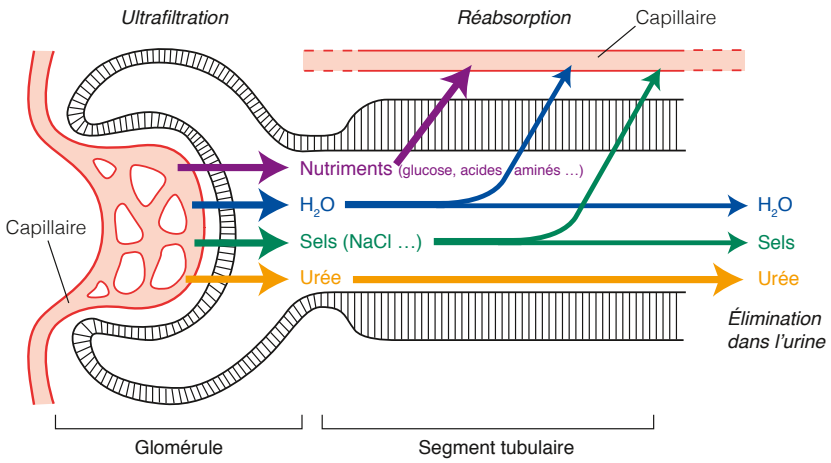


Figure 1.11
Principe du fonctionnement du néphron

La réabsorption de l'eau est contrôlée de manière endocrine par l'ADH (AntiDiuretic 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.

1.4. L'APPAREIL CIRCULATOIRE ASSURE LA DISTRIBUTION DES NUTRIMENTS À L'ENSEMBLE DE L'ORGANISME

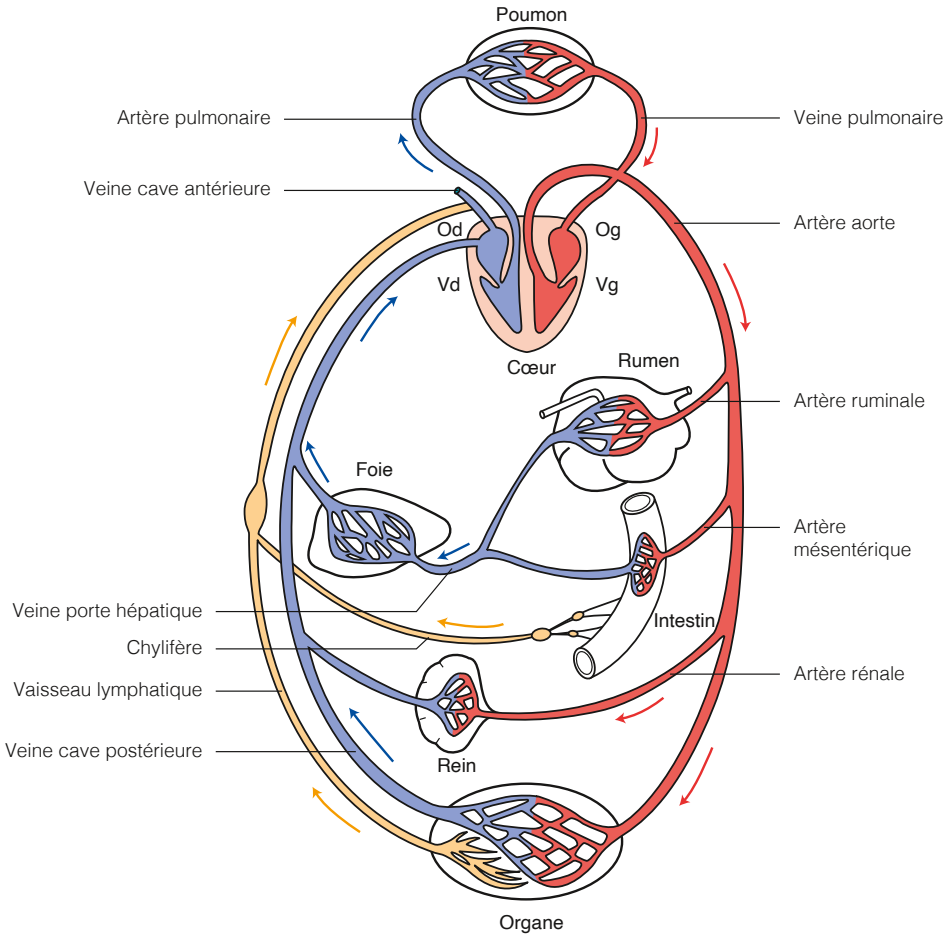
1.4.1. Le transport des substances est assuré par deux liquides circulants : le sang et la lymphe

Chaque organe nécessite l'apport des substances nutritives et du dioxygène dont il a besoin, en provenance de l'appareil digestif et des poumons, et l'élimination des déchets issus de l'activité métabolique, vers les reins et les poumons. Le **sang** assure ces transports, mais aussi le transport des hormones entre les glandes endocrines et les cellules-cibles, et celui des acteurs du système immunitaire, cellules immunitaires et anticorps.
Le sang représente 8 % de la masse corporelle d'un Bovin, soit 56 L pour une vache de 700 kg. Il est constitué de cellules, hématies et leucocytes, en suspension dans un liquide, le plasma.

1.4.1.1. Distribution des fluides

Chez les Vertébrés, le sang circule dans un système de vaisseaux clos, (système circulatoire fermé) et est mis en mouvement par le **cœur**. Le sang quitte le cœur par les artères. Il réalise des échanges avec les cellules uniquement au niveau des **capillaires**. Les capillaires sont des vaisseaux très fins (5 µm de diamètre) dont la paroi n'est constituée que d'une couche de cellules aplaties. Ils forment des réseaux serrés dans les tissus, et sont disposés en parallèle dans le circuit sanguin, chaque segment irriguant un organe déterminé. Le sang retourne au cœur par les veines.
Chez les Mammifères, le système circulatoire est constitué de deux circuits placés en série : il y a une **double circulation** (figure 1.12). La **circulation générale ou systémique** est propulsée par le cœur gauche, elle conduit par l'artère aorte le sang oxygéné aux organes et ramène le sang appauvri en dioxygène au cœur droit par les veines caves. Le cœur droit met en mouvement la **circulation pulmonaire**, qui conduit le sang appauvri en dioxygène aux poumons par les artères pulmonaires et ramène le sang oxygéné au cœur gauche par les veines pulmonaires.

Figure 1.12
Schéma général de la circulation sanguine de la vache et du réseau lymphatique



OD : oreillette droite, VD : ventricule droit, OG : oreillette gauche, VG, ventricule gauche.

1.4.1.2. Zones d'échanges

Dans les tissus, les cellules baignent dans le **liquide interstitiel**, constitué par le plasma et les leucocytes qui ont traversé la paroi des capillaires sanguins (figure 1.13).
Des **capillaires lymphatiques** débutent en cul-de sac dans les tissus où ils drainent un partie du liquide interstitiel et se regroupent en vaisseaux lymphatiques à la sortie des organes. Ces vaisseaux de faible diamètre suivent anatomiquement les veines, communiquent avec les nœuds lymphatiques situés sur le trajet, et se déversent dans la circulation sanguine au niveau de la veine cave antérieure.

Dans la nomenclature actuelle, on utilise le terme « nœud lymphatique ». Le terme « ganglion » est réservé au système nerveux.

Nomina Anatomica Veterinaria, 5e édition, 2012

La mise en mouvement de la lymphe est assurée par les contractions des muscles squelettiques environnants.
La lymphe permet le retour dans le sang du liquide interstitiel non réabsorbé au niveau des capillaires, elle assure le transport des acides gras absorbés au niveau de l'intestin et participe à la défense immunitaire en permettant la rencontre des antigènes avec les lymphocytes dans les nœuds lymphatiques.

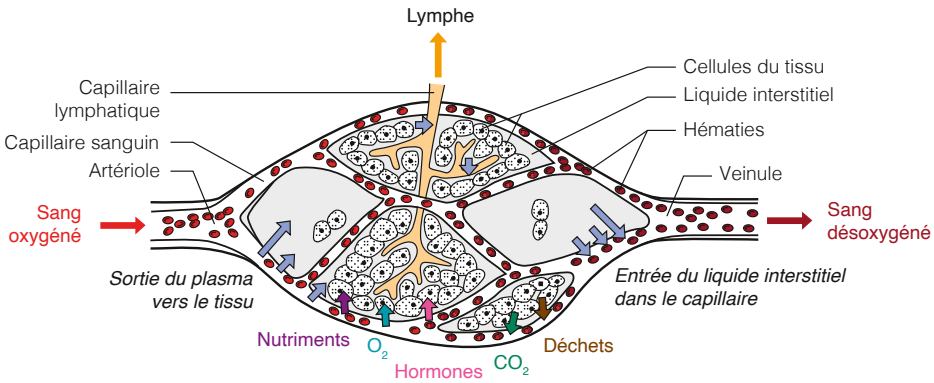


Figure 1.13
Surface d'échange au niveau des tissus et principaux échanges entre cellules et liquides extracellulaires

1.4.2. La pompe cardiaque met le sang en mouvement

Le cœur d'une vache de 700 kg pèse environ 2 kg, c'est un muscle creux enfermé dans un sac fibreux, le péricarde. Comme chez tous les Mammifères, il est constitué de deux moitiés indépendantes comprenant chacune une **oreillette** et un **ventricule**. Les oreillettes, à parois minces, reçoivent le sang venant des veines ; les ventricules, à parois épaisses, refoulent en se contractant le sang dans les artères. À la limite des oreillettes et des ventricules, des valvules atrio-ventriculaires induisent un sens unique de circulation du sang.
Le cœur se contracte de façon automatique, à une fréquence de 50 à 80 battements par minute chez la vache. Le **débit cardiaque** est le volume de sang éjecté par chaque ventricule par unité de temps ; chez la vache il est de l'ordre de 70 L par minute. Le débit cardiaque s'ajuste aux besoins de l'organisme.

➤ *BCPST2 (chapitre 9) : fonctionnement du coeur*

BILAN

L'ensemble des organes étudiés concoure à la fonction de nutrition qui correspond aux échanges d'énergie et de matière des cellules avec l'environnement.

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.

Le milieu intérieur est constitué des liquides extra-cellulaires (plasma sanguin, lymphe et liquide interstitiel). Il est le véritable milieu de vie des cellules : elles y puisent ce dont elles ont besoin pour vivre, et y déversent les déchets de leur activité pour qu'ils soient amenés jusqu'aux sites d'élimination.

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

2. L'ORGANISME ANIMAL EST CAPABLE DE SE REPRODUIRE

2.1. LES APPAREILS GÉNITAUX MÂLE ET FEMELLE PRODUISENT LES GAMÈTES

2.1.1. Production continue des spermatozoïdes par l'appareil génital du taureau

Comme chez tous les Mammifères mâles, l'appareil génital du taureau comporte (figure 1.14) :

- deux gonades, les **testicules**, qui produisent les spermatozoïdes ;
- des **voies génitales**, épididymes, conduits déférents et urètre, qui en assurent le transport ;
- un **organe copulatoire**, le pénis ;
- des **glandes annexes** : vésicules séminales, prostate et glandes bulbo-urétrales, qui sécrètent les composants du liquide séminal.

➤ *BCPST2 (chapitre 5) : production des spermatozoïdes chez les Mammifères*

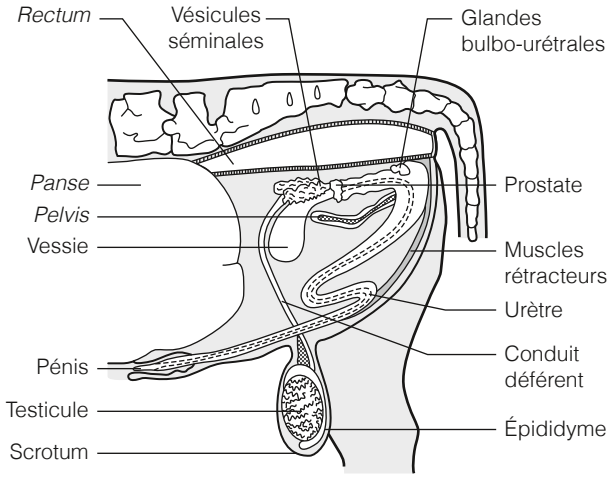


Figure 1.14
Appareil uro-génital du taureau

Rectum, panse, pelvis et *vessie* sont légendés pour repérage mais n'appartiennent pas à l'appareil génital.

➤ *Chapitre 18 (5.1) : passage à l'haploïdie par la méiose*
➤ *BCPST2 (chapitre 3) : brassages génétiques liés à la méiose*

Les testicules sont constitués de tubes séminifères dans lesquels se déroule la spermatogenèse. Les cellules souches, ou spermatogonies y subissent des mitoses qui assurent leur multiplication, et une méiose donnant naissance à des spermatides, cellules arrondies haploïdes, qui se différencient en **spermatozoïdes**, cellules mobiles dotées d'un flagelle. Les **brassages de la méiose** permettent une **diversification des combinaisons alléliques**, les milliers de milliards de spermatozoïdes produits par un taureau au cours de sa vie contiennent des informations génétiques toutes différentes.

La position des testicules dans le scrotum, à l'extérieur de l'abdomen, leur confère une température de 4 à 5 °C inférieure à celle du corps, nécessaire au bon déroulement de la spermatogenèse.

Au cours de leur transit de 14 jours dans l'épididyme, les spermatozoïdes deviennent mobiles et fécondants.

Les testicules assurent une production continue de 7,5 milliards de spermatozoïdes par jour chez le taureau. Ils sont stockés dans la queue de l'épididyme jusqu'à ce que la contraction de l'épididyme les chasse jusqu'à l'urètre où ils se mélangent au liquide sécrété par les glandes annexes. Le sperme est émis lors de l'éjaculation. Chez le taureau, un éjaculat a un volume de 3 à 5 mL et contient environ 6 milliards de spermatozoïdes.

L'ensemble de la gamétogenèse est sous contrôle hormonal : les testicules produisent de la testostérone, sous le contrôle de l'**axe hypothalamo-hypophysaire**.

Le complexe hypothalamo-hypophysaire est situé à la face ventrale de l'encéphale. Il est constitué de deux ensembles de neurones sécréteurs de messagers. L'hypothalamus assure la liaison entre le système nerveux et le système endocrine. Il intègre des stimuli en provenance du monde extérieur (lumière par exemple) et en provenance de l'organisme (influx nerveux, hormones) et assure ainsi l'ajustement des activités de l'organisme aux variations des paramètres externes et internes.

2.1.2. Production cyclique d'un ovocyte par l'appareil génital de la vache

L'appareil génital est très similaire chez tous les Mammifères femelles. Il comprend deux gonades, les **ovaires**, et des **voies génitales**, oviductes ou trompes, utérus et vagin (figure 1.15). Les ovaires n'ont pas de liaison anatomique avec les trompes et les voies génitales sont séparées des voies urinaires, à l'exception des portions terminales (vestibule du vagin et vulve) qui sont communes.

➤ *BCPST2 (chapitre 5) : production des ovocytes chez les Mammifères*

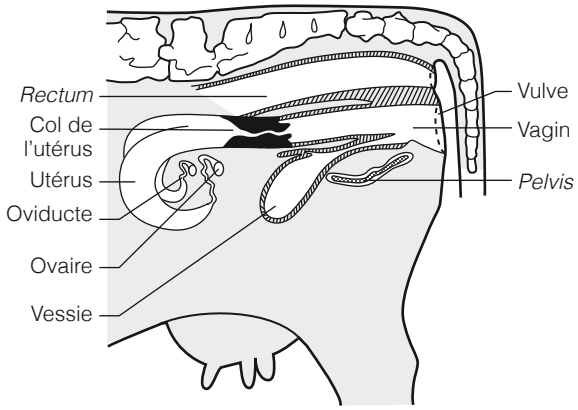


Figure 1.15
Appareil génital de la vache

Vessie, pelvis et rectum sont légendés pour repérage mais n'appartiennent pas à l'appareil génital.

2.1.2.1. Ovogenèse et folliculogenèse

Dans les ovaires, l'ovogenèse se déroule en plusieurs temps. Avant la naissance, dans l'ovaire fœtal, la multiplication active des ovogonies est à l'origine du stock définitif d'ovocytes I. Après la naissance, les follicules primordiaux constituent un stock d'ovocytes I (bloqués en prophase de la première division de méiose) entourés de quelques cellules folliculaires.
À partir de la puberté, entre 6 et 18 mois chez la vache, la méiose et le développement des **follicules** reprennent de façon cyclique, sous le contrôle d'hormones ovariennes (œstrogènes et progestérone), elles-mêmes contrôlées par les messagers du complexe hypothalamo-hypophysaire. Comme chez le mâle, les brassages génétiques de la méiose sont à l'origine d'une **diversification des génotypes** des gamètes femelles.
L'ovulation libère un ovocyte II qui est recueilli par le pavillon de la trompe, le follicule rompu se transforme alors en **corps jaune** impliqué dans la synthèse de la progestérone.

➤ *Chapitre 18 (5.1) : passage à l'haploïdie par la méiose*
➤ *BCPST2 (chapitre 3) : brassages génétiques liés à la méiose*

2.1.2.2. Fonctionnement de l'appareil génital de la vache selon un cycle œstral

Le **cycle œstral** est caractérisé par l'apparition périodique, avant l'ovulation, d'un comportement d'**œstrus**, ou **chaleurs**. Par convention, l'œstrus, facilement repérable du fait du comportement de la vache, marque le début du cycle, d'une durée de l'ordre de 21 jours. L'ovulation a lieu au début du cycle œstral.
Les hormones ovariennes synchronisent l'activité cyclique de l'**utérus** à celle des ovaires. En l'absence de fécondation, le corps jaune régresse, la muqueuse utérine est détruite, sans hémorragie, et la vache entame un nouveau cycle.

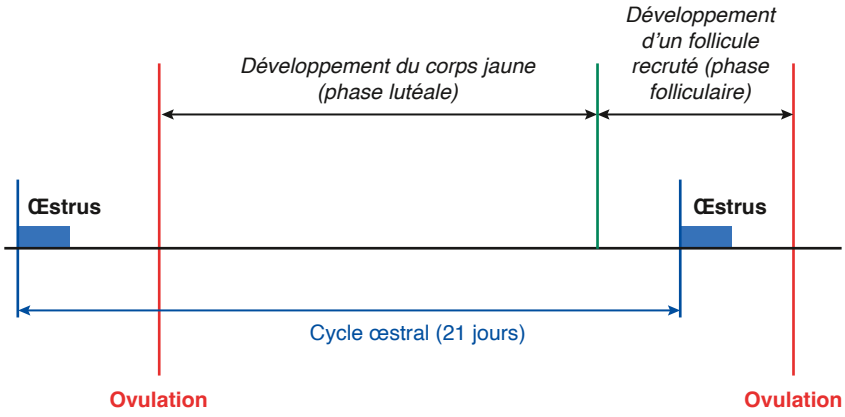


Figure 1.16
Événements au cours du cycle œstral d'une vache

Les cycles sont indépendants des saisons chez la vache et se succèdent toute l'année tant qu'il n'y a pas de gestation.

2.2. RENCONTRE DES GAMÈTES ET DÉVELOPPEMENT DE L'EMBRYON DANS LES VOIES GÉNITALES FEMELLES

2.2.1. La fécondation et le début du développement embryonnaire

2.2.1.1. L'accouplement et la fécondation

L'œstrus est de courte durée chez la vache mais intense. L'agitation et le chevauchement de la vache en œstrus par d'autres vaches permet la détection des chaleurs. Le taureau détecte l'œstrus grâce à la libération de **phéromones** à partir des sécrétions vaginales, la communication auditive (beuglements fréquents) et visuelle (observation d'une augmentation de l'activité de la vache en œstrus).

Lors de l'**accouplement**, le taureau dépose son sperme au fond du vagin de la vache. Cette fécondation interne est une adaptation au milieu aérien. Les spermatozoïdes remontent les voies génitales femelles, et la fécondation survient dans la trompe. Les gamètes se **rencontrent au hasard**, il se forme de **nouvelles combinaisons alléliques diploïdes**. Chaque **zygote** obtenu a ainsi un génotype original.

2.2.1.2. De la fécondation à la nidation

Le zygote ou **cellule-œuf** résultant de la fécondation progresse vers l'utérus tout en se divisant par mitoses.

Une vingtaine de jours après l'ovulation, l'**embryon** pluricellulaire s'implante sur la muqueuse utérine, c'est la nidation. L'enveloppe la plus externe de l'embryon entre en contact avec la muqueuse utérine au niveau de zones discontinues, appelées **placentomes**, sortes de boutons pressions dont la partie maternelle s'appelle **caroncule** et la partie embryonnaire **cotylédon**. Il s'agit des principales zones d'échanges entre le fœtus et la mère. On compte 50 à 100 placentomes de 3 à 5 cm de diamètre chez la vache dont l'ensemble forme le placenta (figure 1.17).

2.2.2. Le développement embryonnaire et fœtal

Une fois implanté, l'embryon se développe « en parasite » de la mère. La durée moyenne totale de la gestation chez la vache est de 280 jours (9 mois environ). La progestérone produite par le corps jaune et des hormones placentaires contrôlent le maintien de la gestation en maintenant le développement de la muqueuse utérine et en inhibant les contractions utérines.

2.2.2.1. Les fonctions du placenta

Le placenta permet le **transfert des nutriments**, des ions, du dioxygène, de la mère vers le fœtus, et le transfert des déchets du métabolisme (CO_2, urée…) en sens inverse (figure 1.17). Il assure la **protection de l'embryon** contre les infections et les substances toxiques. Chez la vache, la barrière placentaire est imperméable aux anticorps, le veau ne bénéficie donc pas de l'immunité maternelle.

Enfin, le placenta produit des **hormones stimulant le maintien de la gestation**, dont l'hormone lactogène placentaire. Chez la vache, le placenta ne prend le relai du corps jaune pour la sécrétion de la progestérone qu'à la fin de la gestation, au 200e jour.

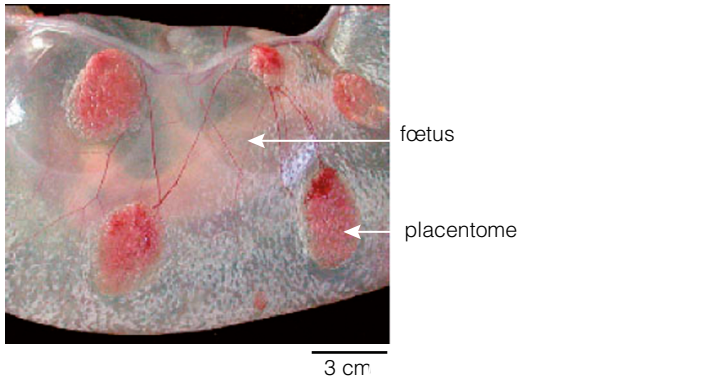


Figure 1.17
Placenta de la vache

A. Placenta cotylédonnaire et fœtus de vache visible par transparence, au 65e jour de gestation
nias.affrc.go.jp [http://www.nias.affrc.go.jp/eng/org/DivAnimal/Physiology/]
B. Échanges au niveau d'un placentome.
Les placentomes sont des sortes de boutons pressions dont la partie maternelle s'appelle caroncule et la partie embryonnaire cotylédon.

2.2.2.2. Les étapes du développement

On distingue deux périodes dans le développement (tableau 1.5) :

- La **période embryonnaire**, au cours de laquelle les principaux organes se forment. Elle s'achève entre le 42e et le 45e jour de gestation chez la vache.
- La **période fœtale** au cours de laquelle les organes ne subissent que des phénomènes de maturation.
- Chez la vache la croissance du fœtus débute très lentement, elle s'effectue principalement dans le dernier tiers de la gestation, où elle s'accélère de façon exponentielle.

➤ *BCPST2 (chapitre 6) : développement embryonnaire d'un Vertébré*

Tableau 1.5
Quelques étapes du développement embryonnaire et fœtal de la vache

		Date d'apparition (en jours de gestation)
Période embryonnaire	Premiers battements cardiaques	19-24
	Ébauche des membres antérieurs	28-31
	Ébauche des membres postérieurs	30-33
Période fœtale	Premiers poils	90
	Éruption des dents	110
	Corps entièrement recouvert de poils	230

2.3. NAISSANCE ET ALIMENTATION LACTÉE DU VEAU

2.3.1. Le vêlage

La naissance requiert d'une part la fin du maintien de la gestation, et d'autre part, le déclenchement des contractions de l'utérus qui permettent d'expulser le fœtus. Elle est déclenchée sous l'effet de modifications hormonales.

Le **vêlage** dure quelques heures. Il débute avec le déclenchement de contractions utérines régulières et la dilatation du col de l'utérus. Le veau se présente avec les pattes antérieures vers l'avant et progresse à travers le canal pelvien puis traverse le canal vaginal (figure 1.18). Son **expulsion** est accompagnée de la rupture des membranes qui l'entourent.

Après l'expulsion du veau, les contractions utérines continuent et aident à détacher et expulser le placenta, c'est ce qu'on appelle la **délivrance** en élevage.

La vache lèche soigneusement son veau jusqu'à ce qu'il soit sec. Le veau tient debout quelques heures après sa naissance.

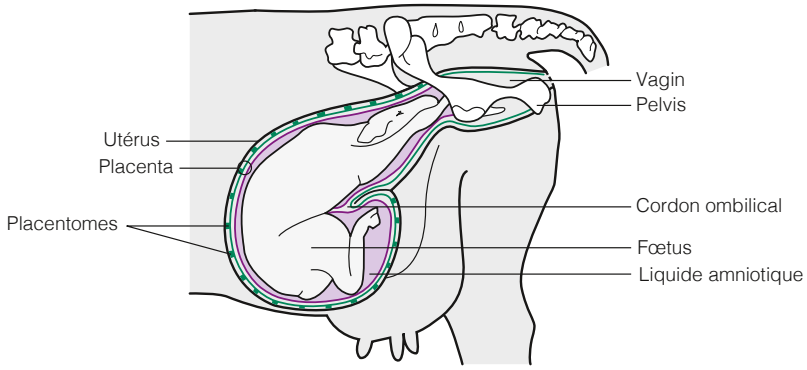


Figure 1.18
Position du fœtus en fin de gestation

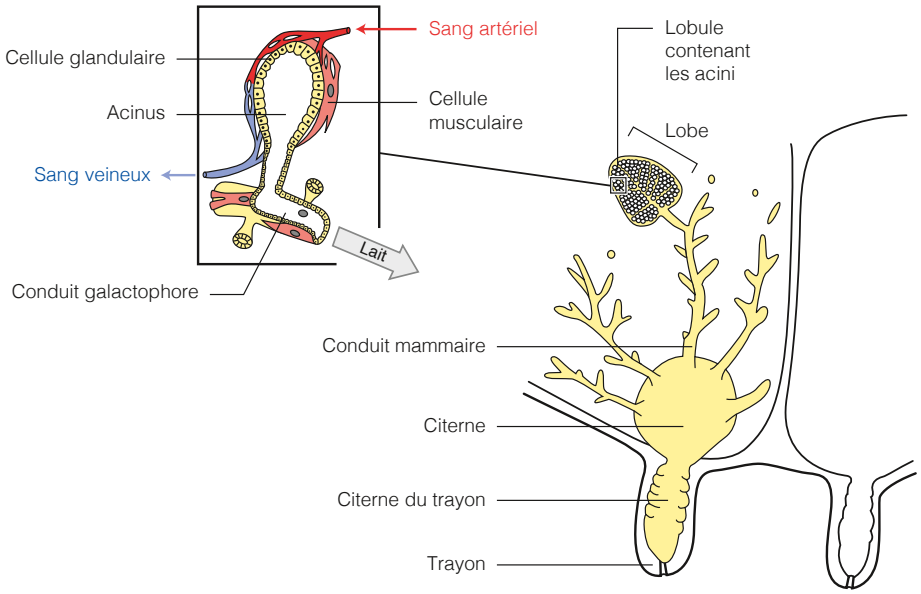
2.3.2. La lactation

2.3.2.1. Organisation de la glande mammaire

La vache possède 4 mamelles, ou **glandes mammaires**, volumineuses et organisées en un organe unique, le pis, terminées par un trayon. Chaque glande mammaire a la structure d'une glande en grappe, et constitue une entité fonctionnelle indépendante.

Les cellules glandulaires sont regroupées en acini. Le lait sécrété dans la lumière de l'acinus est évacué par un des conduits qui confluent dans une citerne, d'une capacité d'un litre chez la vache. Les acini et les conduits sont entourés de cellules contractiles qui permettent l'expulsion du lait (figure 1.19).

Figure 1.19
La glande mammaire : une glande en grappe



2.3.2.2. Production du lait

Au cours de la deuxième moitié de la gestation, le tissu glandulaire et les canalicules se développent. Le développement de la glande mammaire est pratiquement complet au moment de la naissance du veau. La glande est alors fonctionnelle mais sa capacité de synthèse est faible ; elle augmente fortement après la première tétée.

Pendant un ou deux jours après la naissance, un liquide jaunâtre, le **colostrum**, est secrété. Il est constitué essentiellement de **protéines**, et fournit au jeune les **anticorps de la mère** avant que ses propres défenses immunitaires soient fonctionnelles. Ce rôle est particulièrement important pour le veau qui ne bénéficie pas d'un transfert des anticorps maternels à travers le placenta durant la gestation.

Progressivement, le colostrum fait place au **lait** qui permet une croissance rapide du veau : 0,2 à 0,5 gramme de gain de masse corporelle par gramme de lait ingéré (tableau 1.6).

Le lait est synthétisé par l'acinus mammaire à partir d'éléments simples provenant du sang.

Certains composants du lait, comme l'**eau** ou les **immunoglobulines**, sont **transférés directement du sang**. D'autres composants sont **synthétisés par les cellules de la glande mammaire** :

- les **acides gras** sont synthétisés au niveau de l'appareil de Golgi, à partir des acides gras volatils issus du rumen ;
- les **caséines** (protéines) sont polymérisées dans le REG et phosphorylées dans l'appareil de Golgi ;
- le **lactose** est synthétisé dans l'appareil de Golgi à partir de galactose et de glucose.

➤ *Chapitre 19 (2.6.4) : modifications post-traductionnelles des protéines*

Tableau 1.6
Composition du lait de vache

Composants	g/L
Eau	905
Matière grasse, dont :	**36-40**
– Glycérides	36
– Phospholipides	0,4
– Stérols	0,1
Matières azotées, dont :	**33**
– Caséines	27
– Protéines solubles (globulines, albumines…)	5
– Substances azotées non protéiques	1
Lactose	**48-50**
Sels minéraux, dont :	**7-8**
– Calcium (associé aux caséines)	1,25
– Phosphore	1
– Potassium	1,5
– Sodium	0,5
– Magnésium	0,1
– Chlore	1

Les caséines sont organisées en particules sphériques de 0,05 à 0,3 µm de diamètre. Ces particules sont appelées « micelles » de caséines.

La production du lait et son éjection lors de la tétée par le veau ou la traite sont sous contrôle neuro-hormonal.

2.4. UNE REPRODUCTION DES BOVINS D'ÉLEVAGE MAÎTRISÉE PAR L'HOMME

2.4.1. Maîtrise de la fréquence de reproduction des vaches laitières

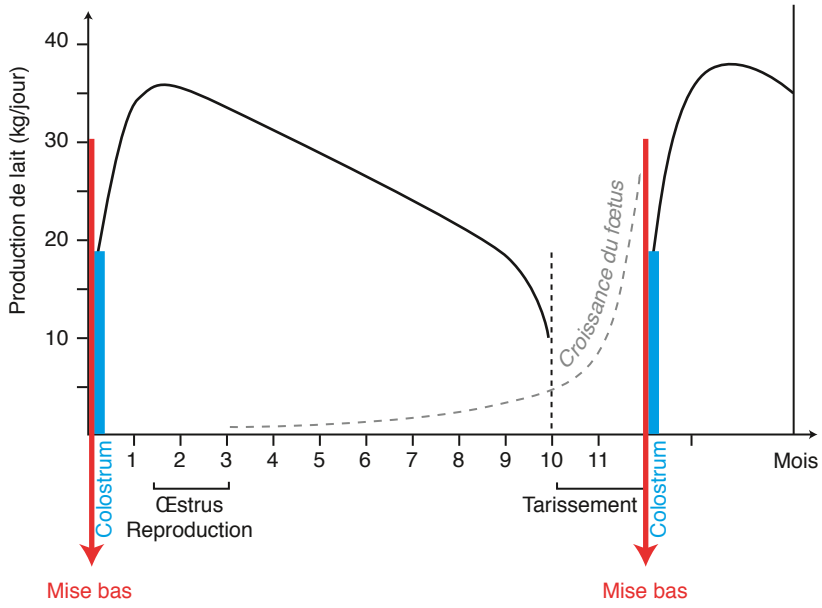
Une production intensive de lait implique que les vaches laitières donnent naissance à un veau chaque année (figure 1.20).

Après la mise-bas, le veau est allaité quelques jours par la mère, et consomme le colostrum, puis il en est séparé. Les veaux femelles sont élevés pour le renouvellement du cheptel, tandis que les veaux mâles sont destinés à la boucherie.

Le lait de la vache est alors collecté de façon mécanisée, par deux traites par jour.

Le premier œstrus survient entre un et trois mois après la mise-bas (œstrus post-partum), la vache est alors à nouveau fécondée, alors que la production de lait se poursuit pendant 9 à 10 mois après la mise bas.
L'arrêt de la traite 10 mois après la première mise-bas entraîne l'arrêt de la production de lait, ou tarissement. Ce repos de 2 mois précédant le vêlage suivant permet le remodelage du tissu mammaire (dont les anciennes alvéoles disparaissent alors que de nouvelles se forment) et la croissance du fœtus.

Figure 1.20
Rythme annuel de vêlage et de lactation d'une vache laitière



Le colostrum est non commercialisable, il est récolté pour être donné au veau.

2.4.2. Insémination artificielle

L'**insémination artificielle** est utilisée en France depuis les années 1940. Aujourd'hui, 90 % des élevages de vaches laitières utilisent l'insémination artificielle et, dans chacun d'eux, au moins 85 % du troupeau sont inséminés.
Le sperme de taureaux sélectionnés est recueilli et sa qualité est analysée. La dilution de sperme permet d'augmenter le nombre de doses obtenues à partir d'un éjaculat (300 doses ou **paillettes** – petit tube très fin d'un volume de 0,25 mL – par éjaculat). Une paillette de sperme de taureau contient environ 12 millions de spermatozoïdes et peut être conservée à long terme par congélation dans l'azote liquide.
L'observation du troupeau par l'éleveur permet de détecter les vaches en œstrus. Une insémination artificielle est réalisée dans les heures qui suivent, par dépôt du sperme dans l'utérus. Ce type de reproduction permet d'optimiser le rythme de vêlage, la vache étant inséminée dès le premier œstrus post-partum au moment optimal par rapport à l'ovulation. Une deuxième insémination est réalisée lors de l'œstrus suivant, en cas d'échec de la première insémination artificielle. Une insémination naturelle n'est tentée en dernier recours qu'après un nouvel échec.

De plus, l'insémination artificielle évite l'élevage coûteux d'un taureau, et permet de diversifier les reproducteurs mâles, en sélectionnant les caractères recherchés, adaptés aux caractéristiques de chaque vache.

2.4.3. Sélection des caractères

La reproduction sexuée génère des individus de la même espèce mais qui ne sont pas parfaitement identiques. Ils se distinguent par des caractères dont certains sont partiellement ou totalement héréditaires.

La **sélection** animale consiste à essayer de favoriser l'expression de caractères désirés et d'éliminer les caractères indésirables en accouplant les individus adéquats de ce point de vue puis en sélectionnant leurs meilleurs descendants. On isole alors des variétés présentant un ensemble de caractères jugés favorables en vue de leur exploitation par l'Homme.

On distingue des **caractères qualitatifs** (couleur de la robe, présence ou absence de cornes, sensibilité aux maladies…) et des **caractères quantitatifs** (quantité et composition du lait, vitesse de croissance, intervalle entre les vêlages …).

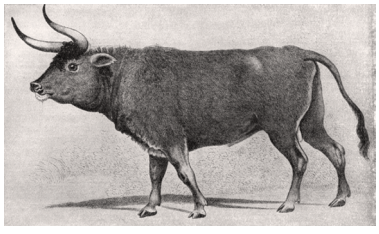
Les vaches actuelles sont le résultat d'une **domestication** et de sélections successives réalisées par l'Homme.

Encart 1.5 La sélection du caractère « sans corne »

Aujourd'hui les Bovins ne sont plus utilisés comme animaux de trait. Les cornes, dont on se servait pour lier les animaux au joug, n'ont plus d'utilité pour l'Homme. De plus, elles peuvent occasionner des blessures entre animaux au sein du troupeau, ou de l'éleveur. On pratique donc l'écornage qui est l'ablation traumatisante des cornes réalisée chez le veau. Une alternative est l'utilisation de reproducteurs porteurs de l'allèle dominant « sans cornes », originaire de races bovines anglo-saxonnes. La pratique, généralisée aux Etats-Unis, est encore peu répandue en France. Un programme d'introduction de l'allèle « sans cornes » existe pour la race Charolaise depuis 1994, et l'allèle commence aussi à être diffusé dans les races Limousine et Salers.

2.4.3.1. La domestication des Bovins au Néolithique

Les données d'archéozoologie et de génétique montrent que des Bovins ont été domestiqués pour la 1re fois à partir de l'**aurochs**, *Bos primigenius* au Proche-Orient, dans le Croissant fertile, il y a environ 8 à 10 000 ans. L'analyse du génome mitochondrial suggère que tous les Bovins européens descendent de ces premiers individus. Les aurochs sauvages ont subsisté en Europe jusqu'au Moyen Âge, le dernier individu ayant été tué en Pologne en 1627 (figure 1.21). L'aurochs se distingue des Bovins domestiques par une taille et une masse supérieures (1 000 kg, 2 m au garrot pour les plus gros mâles), de grandes cornes en spirale, un dimorphisme sexuel marqué, des mamelles discrètes chez les femelles, et un caractère peureux, ou agressif s'il est attaqué.



Gravure extraite de Mertens, A. (1906)
Abhandlungen und Berichte des Museums für Natur-und Heimatkunde zu Magdeburg 1(2), 1-119.

Figure 1.21
Aurochs représenté sur le tableau d'Augsburg, gravure datant du premier quart du XVIe siècle

À partir de captures dans la population sauvage, les individus porteurs de caractéristiques recherchées (production, mais aussi aptitude à la vie en captivité, docilité…) ont été retenus comme reproducteurs. Cet élevage sélectif a été mené pendant de très nombreuses générations : la **domestication** a été un **long processus**. Les Bovins ont été élevés pour leur lait, viande et cuir, mais aussi pour leur fumier et comme bêtes de trait.
Les variations observables parmi les 800 races de Bovins d'élevage actuels sont bien plus grandes que celles qui existaient chez l'espèce sauvage ancestrale. Les principaux moteurs de cette diversification sont l'expansion démographique permise par l'association avec l'Homme, la sélection par l'homme des individus présentant une **nouveauté phénotypique** due aux mutations, et la diversité des modes d'utilisation des Bovins.
Ainsi les changements génétiques qui se sont produits (changements du nombre et du type de gènes, formation de nouveaux allèles) ont pu modifier la biologie du bétail, notamment sa reproduction, son immunité, sa lactation et sa digestion.

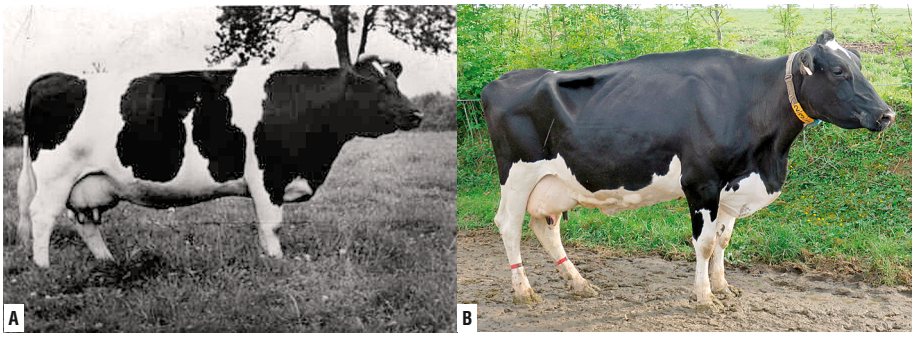
2.4.3.2. Un exemple de sélection : la race Prim'Holstein et l'amélioration de la production laitière

La Pie noir, connue dès le XV^e^ siècle, est une race mixte originaire du nord-ouest de l'Europe caractérisée par une grande taille, un squelette plutôt fin, des cornes courtes et une robe pie (présentant des plages blanches), une très bonne aptitude laitière et une bonne aptitude à l'engraissement.
Au XVIII^e^ siècle, les colons hollandais importent la Pie noir sur le continent américain. À partir de la fin du XIX^e^ siècle, et surtout après la 2^e^ guerre mondiale, une sélection des qualités laitières est réalisée par les éleveurs américains, pratiquement sans apport de nouveaux individus, donnant naissance à la race laitière Holstein sélectionnée sur les critères de forte production laitière et de qualités de mamelle (tableau 1.7).
En Europe, la sélection de la race Pie noir, rebaptisée Française Frisonne Pie noir (FFPN) en 1952, réalisée à la même époque, portait sur d'autres critères tels que l'amélioration de la teneur du lait en matière grasse et la morphologie (figure 1.22).
En 1973, les producteurs français ont pris conscience que les vaches FFPN produisaient une quantité de lait beaucoup plus faible que les vaches Holstein d'Amérique du Nord. À partir de 1975, un programme d'insémination des meilleures vaches laitières FFPN par du sperme de taureau Holstein a été entrepris pour améliorer la production laitière. Ce programme d'amélioration a abouti à la création de la race prim'Holstein en 1990.
Alors qu'une vache produisait au début du XX^e^ siècle juste assez de lait pour nourrir un veau, soit un maximum de 2 à 10 L/jour, les vaches Prim'Holstein produisent aujourd'hui de façon courante 30 à 40 L/jour.
En 2010, plus de 60 % du cheptel laitier français était constitué de vaches Prim'Holstein.

Tableau 1.7
Évolution de la production laitière et du taux de matières grasses du lait depuis le début du programme de sélection

		Race	Production de lait (en kg/an)	Teneur en matière grasse (en ‰)
Avant le programme de sélection	1973	Française Frisonne Pie noir	4000	37
		Holstein Amérique du Nord	6476	35,3
Depuis le début du programme de sélection	1980	Française Frisonne Pie noir	4866	38,9
	1986	Française Frisonne Pie noir	6637	39,1
	2007	Prim'Holstein	8823	39,5
	2012	Prim'Holstein	9411	39,7

Figure 1.22
Évolution de la morphologie de la Frisonne Pie noir à la Prim'Holstein



A. Vache Frisonne, années 1950. Primholstein.com [http://primholstein.com/la-prim-holstein/historique/]
B. Vache Prim'Holstein, 2013.

Encart 1.6 L'amélioration de l'espèce bovine : techniques modernes de reproduction des Bovins et amélioration génétique

- **Insémination artificielle et évaluation des qualités génétiques des taureaux**
  Pour estimer la valeur génétique d'un taureau, il faut obtenir rapidement de nombreux descendants afin d'en étudier les caractéristiques. L'insémination artificielle avec congélation du sperme permet de constituer un stock important, de 50 000 doses pour chaque taureau choisi comme éventuel reproducteur. On teste les qualités reproductrices d'un taureau en inséminant une cinquantaine de vaches dont on évalue les qualités de la descendance obtenue (pour la production de lait, par exemple). Pour différents taureaux étudiés, on peut ainsi déterminer lequel a une descendance dont les performances sont supérieures à la moyenne. Le sperme de ces **taureaux dits « améliorateurs »** est alors utilisé à grande échelle.

- **Transfert d'embryons et évaluation des qualités génétiques des vaches**
  Une vache n'ayant en moyenne qu'un veau par an, il est plus difficile de faire une étude statistique des performances de sa descendance. Le **transfert d'embryon** permet d'augmenter la prolificité d'une vache. La vache dont on souhaite évaluer les qualités génétiques est soumise à un traitement hormonal entraînant des ovulations multiples. Les embryons obtenus suite à une insémination artificielle (jusqu'à une dizaine) et prélevés une semaine après la fécondation (ou, technique plus récente, suite à un prélèvement des ovocytes et une fécondation *in vitro*) sont réimplantés séparément dans l'utérus de vaches receveuses. Ils peuvent aussi être conservés dans l'azote liquide pour une réimplantation différée. L'évaluation des performances des descendants obtenus permet d'identifier les meilleures vaches pour l'amélioration recherchée.
  Par ces méthodes, les qualités des reproducteurs testés sont évaluées *a posteriori* par les performances de leur descendance.

- **Sélection génomique**
  Depuis les années 2000, la génomique a révolutionné la sélection des Bovins laitiers. Le séquençage du génome bovin et l'identification de **sites nucléotidiques polymorphiques** (SNP Single-Nucleotid Polymorphism) dans une race ont permis d'identifier plusieurs dizaines de milliers de marqueurs. En comparant les SNP d'un nombre suffisamment élevé de taureaux dont les qualités de reproducteurs sont connues grâce à leur descendance, on peut estimer l'effet de chaque SNP pour un caractère donné.

➤ *Chapitre 17 (2.2.2.2) : séquences non codantes dans le génome nucléaire des Eucaryotes*

De jeunes sujets, qui ne se sont pas encore reproduits, peuvent ainsi être évalués, et sélectionnés, sur la base de leurs marqueurs génomiques. En France, les 3 principales races laitières, Holstein, Montbéliarde et Normande, font l'objet d'un programme de sélection génomique depuis 2001 qui permet de tester un plus grand nombre d'individus et d'augmenter le nombre de reproducteurs utilisés.
Par la sélection génomique les qualités des reproducteurs testés peuvent être prédites avant même qu'une descendance soit obtenue.

BILAN

La fonction de reproduction est l'ensemble des processus par lesquels les individus engendrent de nouveaux individus de la même espèce. Chez les Mammifères, il s'agit d'une reproduction sexuée, faisant intervenir des gamètes mâles et femelles. Les brassages génétiques liés à la production des gamètes et au hasard de leur rencontre sont à l'origine de la diversification des génotypes.

En plus des gonades, qui produisent les gamètes et sécrètent les hormones sexuelles, le système reproducteur comprend des voies génitales spécialisées dans l'hébergement et le transport des gamètes ainsi que des glandes annexes. Les voies génitales des Mammifères femelles sont le siège de la fécondation et de la gestation, ce qui constitue une adaptation au milieu aérien. Les soins maternels se prolongent après la naissance, en particulier par la lactation.

En choisissant les individus reproducteurs en fonction de ses besoins, l'Homme opère une sélection artificielle. Ce tri parmi la diversité des individus a permis la domestication puis la diversification des races bovines.

3. L'ORGANISME ANIMAL INTERAGIT AVEC L'ENVIRONNEMENT : IL PERÇOIT DES STIMULI EXTERNES, SE DÉPLACE ET SE PROTÈGE

3.1. LA VACHE EST UN ANIMAL GRÉGAIRE

Les vaches sont habituées à vivre en **troupeau** et deviennent stressées lorsqu'elles sont séparées du reste du groupe
Les troupeaux d'élevage, entièrement constitués de femelles, respectent une **hiérarchie sociale** comprenant en particulier une ou plusieurs vaches dominantes, des vaches leaders (différentes des vaches dominantes) et des vaches soumises.
Les **vaches dominantes** sont généralement les plus imposantes et les plus âgées ; il y en a une, voire plusieurs, par troupeau. Chez les femelles adultes, ces relations sont très stables et peuvent persister plusieurs années. Un individu dominant est défini comme celui qui peut attaquer sans être agressé, et qui jouit de priorité lorsqu'il y a compétition pour une ressource limitée. Les **relations de dominance-subordination** s'établissent soit au cours du développement du jeune animal, soit lorsque des animaux adultes sont introduits dans un troupeau.

Les vaches dominantes s'imposent en donnant des coups de tête, ou en poussant les autres vaches, tandis que les vaches soumises évitent les contacts avec les dominantes. Un comportement social normal au sein du troupeau est le léchage qui a un effet apaisant. Ceci crée des liens entre les individus du groupe et limite l'apparition des conflits. Une vache de haut rang social ne lèche jamais une vache de plus bas rang, en revanche, une vache de bas rang lèche souvent une vache de plus haut rang social. Des vaches de même rang social sont souvent des partenaires privilégiés qui se lèchent mutuellement.
Au Néolithique, ce type de relation sociale a pu faciliter la domestication, les humains étant identifiés comme des individus dominants.
La **vache leader**, ou **vache meneuse**, est celle qui initie des déplacements de groupe, et se trouve généralement en tête du mouvement. La vache leader initie aussi l'activité de groupe, par exemple pâturer ou se reposer.

3.2. LA VACHE PERÇOIT SON ENVIRONNEMENT ET Y RÉAGIT

3.2.1. Le système nerveux est un système de communication constitué de cellules spécialisées excitables

➤ *BCPST2 (chapitre 8) : communication nerveuse*

Les messages nerveux sont constitués de trains de **potentiels d'action**. Ils sont codés en fréquence de potentiels d'action et sont propagés par un réseau de cellules spécialisées : les **neurones**. Ces cellules excitables composent la plupart des récepteurs sensoriels, les voies de conduction et les lieux d'intégration.
Le système nerveux de la vache, comme celui des autres Vertébrés, comprend (figure 1.23) :

- Le **système nerveux central** : l'encéphale, contenu dans la boîte crânienne, et la moelle épinière, logée dans le canal rachidien de la colonne vertébrale.
- Le **système nerveux périphérique** : des nerfs reliant les centres nerveux à des systèmes sensoriels ou à des organes effecteurs.
- Le **système nerveux somatique** contrôle la vie de relation : le système nerveux central intègre les informations en provenance des récepteurs sensoriels et génère des influx nerveux moteurs à destination des muscles squelettiques. Il est constitué de 12 paires de nerfs crâniens reliés à l'encéphale et 36 ou 37 paires de nerfs rachidiens en lien avec la moelle épinière.
- Le **système nerveux autonome** assure le contrôle non volontaire des fonctions internes. Il contrôle notamment les muscles lisses, le cœur, les glandes sécrétrices. Il comprend deux divisions dont les actions sur les organes effecteurs sont le plus souvent antagonistes (exemple : effet cardio-accélérateur et cardio-modérateur).

3.2.2. La diversité des organes sensoriels permet la perception de l'ensemble des caractéristiques de l'environnement

Les **organes des sens**, œil, oreille, cavité nasale, langue et tégument perçoivent des informations en provenance du monde extérieur à l'organisme (tableau 1.8).
Tous les systèmes sensoriels fonctionnent selon le même principe : les informations captées par les récepteurs sensoriels sont traduites en message nerveux qui correspond à un train de potentiels d'action codé en fréquence. Le message nerveux est transmis le long des voies sensorielles ou afférentes jusqu'au système nerveux central qui l'interprète et élabore un message nerveux moteur (figure 1.23).
La localisation de plusieurs récepteurs au niveau de la tête permet la perception du milieu vers lequel l'animal se dirige (figure 1.24).

Il existe aussi des récepteurs sensoriels internes : barorécepteurs, chémorécepteurs, thermorécepteurs, qui renseignent le système nerveux central sur la composition ou l'état du milieu intérieur.

Figure 1.23
Communications nerveuses chez un Vertébré

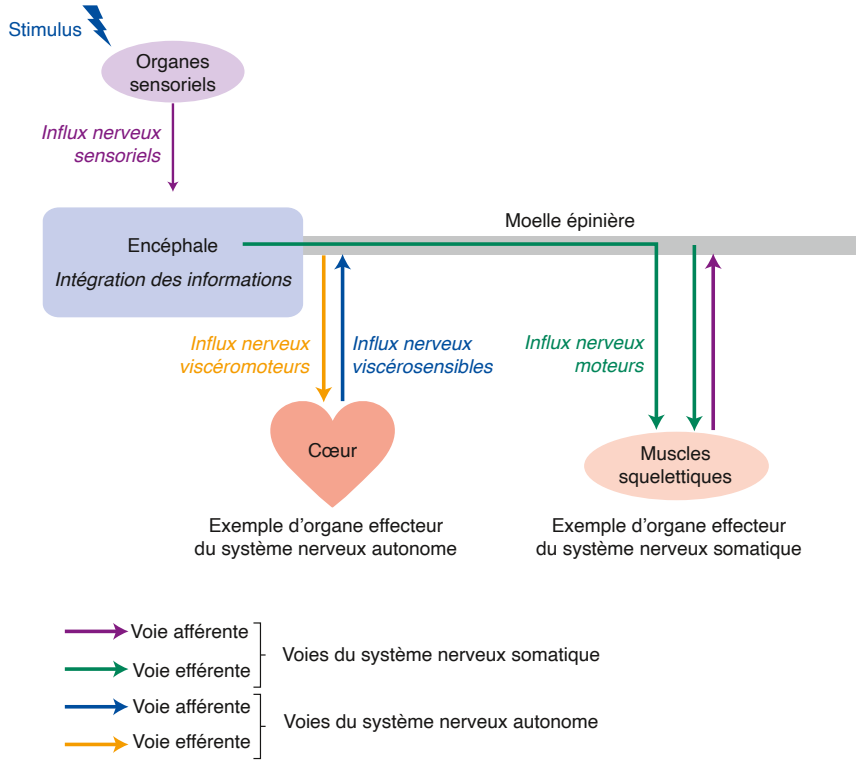


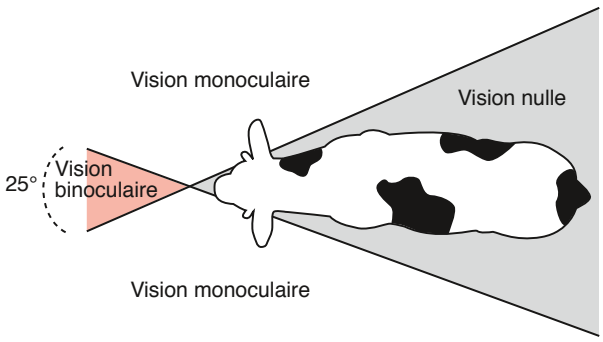
Tableau 1.8
Principaux organes sensoriels de la Vache

Fonction	Organe sensoriel	Récepteur sensoriel	Stimulus	Particularités chez la vache
Vision	Œil	Photorécepteurs	Lumière	Large champ de vision, vision binoculaire restreinte, myopie, ajustement lent aux variations d'intensité
Audition	Oreille	Mécanorécepteurs	Vibrations sonores	Pavillon mobile. Perception des hautes fréquences, jusque 35,000 Hz (20,000 Hz chez l'homme). Fréquence de perception optimale : 8 000 Hz qui correspond à la fréquence des cris d'alarme, peut être entendue dès une intensité de 11 décibels
Equilibration			Position de la tête	
Olfaction	Cavité nasale	Chimiorécepteurs	Substances chimiques en solution	Grande sensibilité aux odeurs Communication olfactive entre les individus (phéromones)

Fonction	Organe sensoriel	Récepteur sensoriel	Stimulus	Particularités chez la vache
Gustation	Langue	Chimiorécepteurs	Substances chimiques en solution	Sensibilité aux 4 goûts primaires (sucré, salé, amer, acide)
Somesthésie : Toucher, pression Température Douleur	Tégument	Mécanorécepteurs Thermorécepteurs Nocirécepteurs	Pression Variations de température	Récepteurs à la pression répartis dans tout l'organisme. Récepteurs tactiles au niveau de la peau, zones les plus sensibles : joues, encolure, attache de la queue, intérieur des cuisses, mamelle, vulve. Récepteurs à la douleur répartis dans tout l'organisme. Peu de signes extérieurs de souffrance (cela évite d'attirer l'attention d'un prédateur dans le cas des Bovidés sauvages)

La somesthésie est la perception des modifications de la peau, des articulations, des ligaments, des muscles et des tendons.

Figure 1.24
Champ de vision de la vache



Dans le cerveau, le cortex visuel intègre les informations en provenance des deux yeux pour élaborer les sensations visuelles. En particulier, la vision binoculaire issue de la superposition des images provenant des deux yeux permet la perception des distances et du relief.
Dans le cas de la vache, dont les yeux occupent une position latérale, le champ de vision est très large (près de 330°), mais la zone de vision binoculaire est restreinte à un cône de 25° vers l'avant. En revanche la vision monoculaire latérale lui permet de voir tout ce qui se passe autour d'elle sans bouger la tête, et de repérer un éventuel prédateur, dans le cas des Bovidés sauvages.

➤ *BCPST2 (chapitre 7) : structure / fonction de la cellule musculaire striée squelettique*

Les muscles squelettiques ont leurs extrémités insérées sur le squelette, ils permettent d'exercer soit un mouvement relatif des os autour d'une articulation, soit une force statique.

3.2.3. L'activité locomotrice de la vache est sous contrôle nerveux

L'intégration des informations reçues par le système nerveux central aboutit à l'émission de messages nerveux qualifiés de moteurs, véhiculés par des **nerfs moteurs** ou **efférents**, à destination des muscles squelettiques.

3.2.3.1. Des membres chiridiens assurent le soutien et la mobilité de l'organisme

La vache est un **Vertébré tétrapode**. Les **membres** antérieurs et postérieurs sont rattachés au tronc et la colonne vertébrale par des parties fixes appelées ceintures : les membres antérieurs par la **ceinture scapulaire**, et les membres postérieurs par la **ceinture pelvienne**. Les membres sont formés de plusieurs segments articulés entre eux : le **stylopode**, le **zeugopode** et l'**autopode** (tableau 1.9).

Tableau 1.9
Membre chiridien-type des Vertébrés tétrapodes et organisation spécifique chez la vache

	Membre antérieur		Membre postérieur	
	Type chiridien primitif	Caractères spécifiques à la vache	Type chiridien primitif	Caractères spécifiques à la vache
Ceinture	Ceinture scapulaire : clavicule, omoplate	Clavicule absente	Ceinture pelvienne : pubis, ilion, ischion	
Stylopode	Bras : humérus		Cuisse : fémur	
Zeugopode	Avant-bras : cubitus, radius		Jambe : péroné (+ rotule), tibia	
Autopode	– Poignet : carpe (une dizaine d'os) – Paume de la main : métacarpes (5 os) – Doigts : phalanges (3 os pour chaque doigt, sauf pour le pouce : 2 os)	– Carpe : 6 os – Présence des seuls métacarpes III et IV, soudés en un os canon – Présence des seuls doigts III et IV	– Cheville : tarse (une dizaine d'os) – Plante du pied : métatarses (5 os) – Doigts : phalanges (3 os pour chaque doigt, sauf pour le pouce : 2 os)	– Tarse : 5 os – Présence des seuls métatarses III et IV, soudés en un os canon – Présence des seuls doigts III et IV

Des membres aux mouvements pendulaires

Chez la vache, le péroné est réduit à un stylet, le cubitus est aminci distalement et soudé au radius. Aucune rotation des membres n'est donc possible, les os ont une fonction de soutien. Les membres fonctionnent comme des balanciers, d'arrière en avant et d'avant en arrière. Lorsqu'elle marche, la vache pose la patte arrière à l'emplacement libéré par la patte avant du même côté. L'absence de mouvements latéraux est corrélée à la disparition de la clavicule. Le membre antérieur, plus court et situé plus près du centre de gravité est surtout porteur, tandis que le membre postérieur est essentiellement propulseur (figure 1.25).