

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE FRERES MENTOURI - CONSTANTINE 1
INSTITUT DES SCIENCES VETERINAIRES**

DEPARTEMENT DE PRODUCTION ANIMALE

Cours d'Alimentation Animale

Destiné aux étudiants de deuxième année
Docteur Vétérinaire

Programme du deuxième semestre



Origine photos : Rupert., R et Radigue., P-E. (2014)

**Dr BENLAKSIRA. B
Maître de Conférences B**

2019 – 2020

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

1. Composition des aliments

Les aliments distribués aux bovins sont composés d'eau et de divers nutriments : des glucides, des lipides, des matières azotées, des vitamines et des minéraux, ainsi que des substances totalement dépourvues de valeur nutritive, telle que la lignine. Lorsqu'un aliment est placé dans une étuve, l'eau contenue dans cet aliment s'évapore, on obtient une matière sèche (MS). Tous les aliments contiennent une certaine fraction de MS dont la teneur de l'herbe varie aux alentours de 20 %, alors que celle du foin et des céréales se situe plutôt respectivement aux environs de 85 et 90 %.

La MS comprend d'une part la matière organique (MO), caractérisée par la présence d'atomes de carbone, et d'autre part la matière minérale (MM). Les composants de la matière organique sont les glucides, les lipides, les matières azotées et les vitamines. La matière minérale comprend quant à elle, les minéraux.

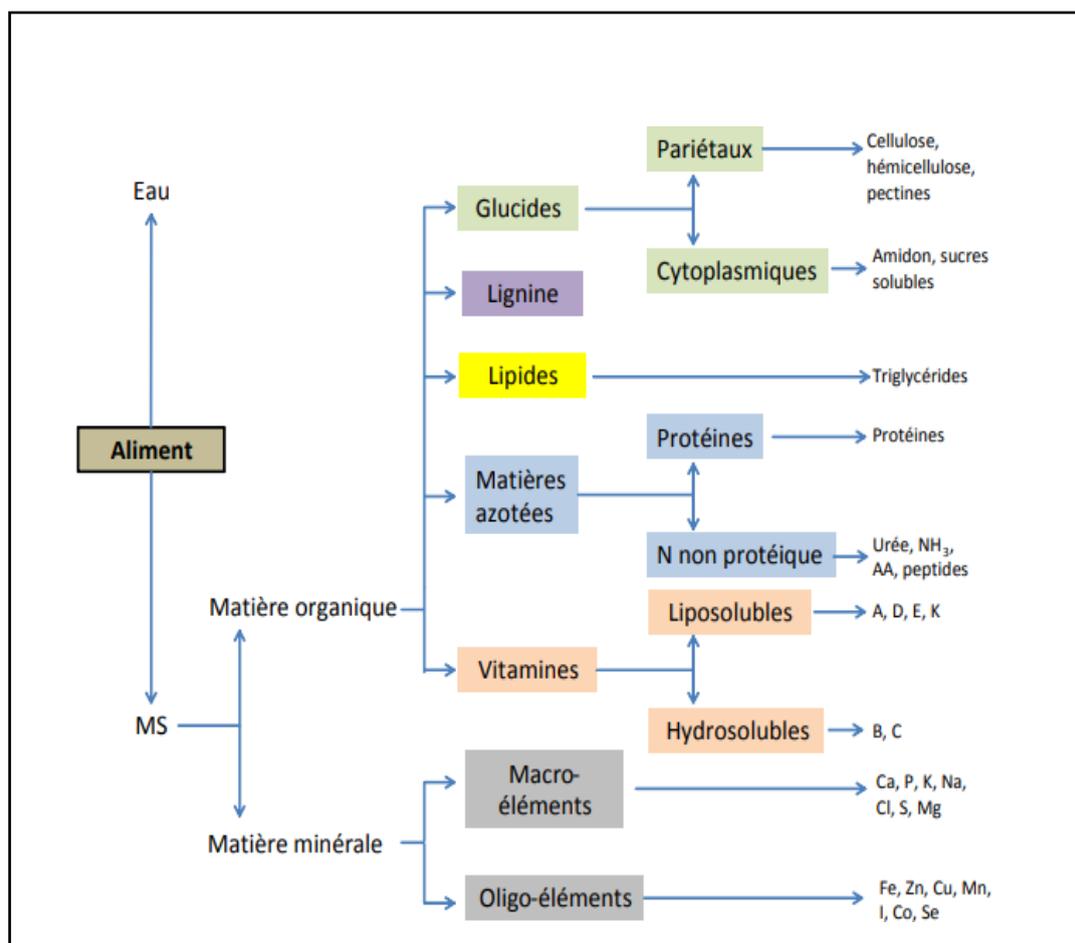


Figure 1: Composition des aliments (Brocard *et al.*, 2010)

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

2. Apport hydrique

L'eau est le constituant le plus abondant de l'organisme. Sa proportion dans la masse corporelle totale diminue avec l'âge et l'état d'engraissement, 75% chez le veau à la naissance à 40% chez les bovins adultes très gras.

Les tissus des végétaux en pleine activité métabolique sont gorgés d'eau. Celle-ci forme normalement plus de 80% du poids de la matière végétale ; on y trouve deux types d'eaux, l'eau dissoute dont laquelle se trouve les substances hydrosolubles (protides, glucides, minéraux, vitamines et gaz), et l'eau fixe non mesurable. La première a un rôle fonctionnel et la deuxième un rôle plastique.

Chez les ruminants, l'eau du contenu digestif est importante 12-18% du poids vif. Le renouvellement rythmique de l'eau corporelle augmente avec l'intensité de la production, la température et la ration alimentaire (riche en Na Cl).

Les besoins en eau chez les ruminants sont couverts par l'eau totale ingérée (apport d'eau exogène) mais également par l'eau qui est produite dans l'organisme suite aux réactions métaboliques (oxydation des nutriments, polymérisation,..) ou suite aux catabolismes des glucides, lipides et protéines.

Dépenses en eau

Les animaux perdent de l'eau par cinq voies essentielles, il ya les dépenses liées à la :

***Digestion et au métabolisme**, ces dépenses augmentent avec la quantité de substances indigestibles et de déchets à éliminer dans les fèces et les urines

- Fèces : La quantité d'eau perdue par voie fécale est plus importante chez les ruminants que chez les monogastriques.
- Urines : La perte d'eau par voie urinaire augmente avec la quantité de produits de déchets du métabolisme que le rein doit éliminer (urée). L'excès d'eau ingéré (fourrage aqueux) est éliminé par l'urine.

***Thermorégulation**, ces dépenses dépendent de la température ambiante

- Poumons, peau: Les dépenses d'eau par vaporisation se fait par les poumons et la peau. La transpiration est absente chez certaines espèces (bovins).

* Production

- Chez la vache, le lait contient 87% d'eau

RQ : La mort de l'animal peut survenir si la perte d'eau dépasse 10% du poids du corps.

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

Fonction de l'eau dans l'organisme :

- Echanges nutritifs (absorption, transport, excrétion)
- Réactions métaboliques
- Régulation de la température (transport et élimination de la chaleur)
- Chez les ruminants suite à l'importance de la sécrétion digestive les échanges entre l'appareil digestif et le sang mettent en jeu des quantités d'eau considérables.

3. Constituants glucidiques

Les glucides peuvent se classer en deux catégories selon leur localisation ou répartition dans la cellule végétale. La première catégorie correspond aux glucides cytoplasmiques ou intracellulaires et la deuxième catégorie est celle des glucides pariétaux.

Tableau 1: Principaux glucides cytoplasmiques et constituants pariétaux d'une cellule végétale
(Drogoul *et al.*, 2004)

Localisation	Dénomination		Unités constitutives
Contenu cellulaire	Sucres libres	Glucose Fructose Saccharose Mélitiose	Glucose, Fructose Glucose, Galactose
	Polyosides de réserve	Fructosanes Amidon	Fructose Glucose
Pariois	Polyosides	Cellulose	Glucose
		Hémicellulose	Xylose, Arabinose, Galactose, Mannose, Glucose, Acide glucuronique
		Substances pectiques	Acide galacturonique, Arabinose, Galactose
	Substances non glucidiques	Lignine	Alcool coumarylique Alcool coniférylique Alcool synapylique
		Cires (cutine)	Alcools et acides gras à longue chaîne

3.1. Glucides cytoplasmiques

Ils sont contenus à l'intérieur de la cellule végétale. Ce sont des substrats ou des intermédiaires du métabolisme cellulaire des glucides, et des glucides de réserve. Les glucides cytoplasmiques comprennent donc:

- **Les glucides hydrosolubles:** Les glucides hydrosolubles (fructose, saccharose, glucose 3-8% de la MS) de digestibilité totale, ils représentent en général moins de 10% de la matière sèche des aliments d'origine végétale. Quelques graminées jeunes, des betteraves et de la mélasse ont beaucoup plus riches, leur concentration maximale est atteinte avant le

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

début de l'épiaison des graminées et peu avant le début du bourgeonnement des légumineuses.

- **Les polyholosides de réserve (amidon) :** Le glucose produit lors de la photosynthèse peut être transformé en amidon. C'est sous cette forme qu'il est stocké dans le chloroplaste. Les amidons sont mis en réserve dans les plastes des cellules végétales et peuvent présenter jusqu'à 30 ou 60 % du poids sec d'un tissu végétal. Chez l'animal, l'amidon est hydrolysé par une amylase. Les fructosanes sont accumulés à la base des tiges des graminées.

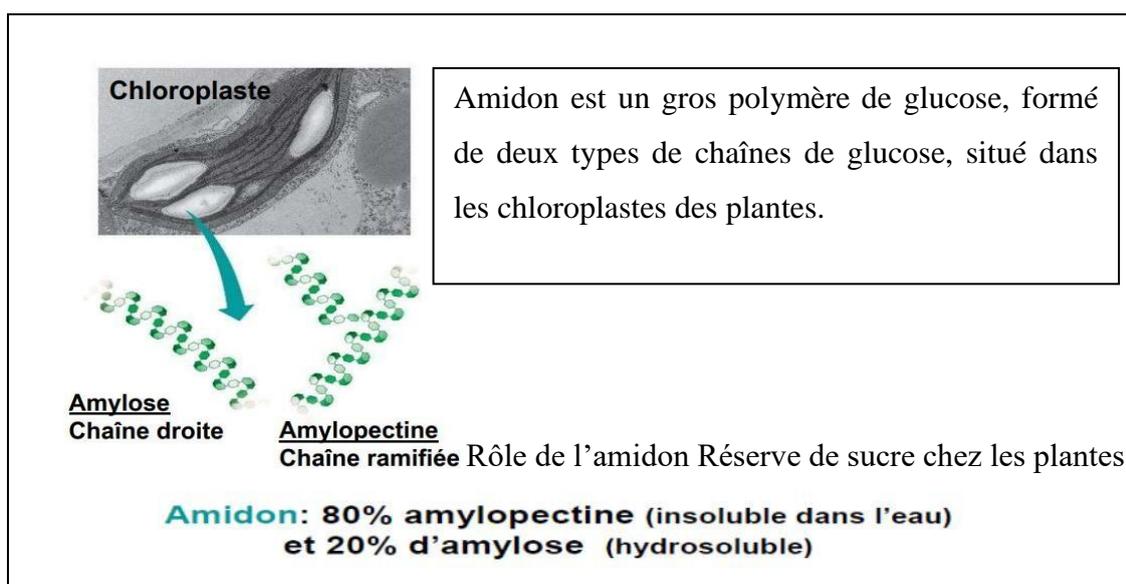


Figure 2 : Amidon sucre de réserve chez les plantes (Raaf., N et Griene., L. 2015).

3.2. Glucides pariétaux

Ceux sont les constituants des parois cellulaires, on distingue :

- **Glucides proprement dits (polyosides)**, on dénombre 3 groupes de polyosides :

La cellulose, les hémicelluloses et substances pectiques : on ne les retrouve que dans les **aliments d'origine végétale** avec la lignine qui est un polymère phénolique. Les hémicelluloses et la cellulose sont systématiquement liées et enchevêtrées pour constituer la base de la paroi végétale. Les hémicelluloses sont moins résistantes à l'hydrolyse que la cellulose et elles ont une composition beaucoup plus variée

- **Constituants non glucidiques**, la lignine fait partie des constituants non glucidiques. Les pectines forment l'ensemble des fibres dites solubles.

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

Les glucides pariétaux ne peuvent pas être hydrolysés par les enzymes glycolytiques sécrétées par le tube digestif. Ces dernières ont une action α -glycosidase mais non β -glycosidase et ne sont pas capables d'hydrolyser les liaisons rassemblant les polymères d'acide α -galacturonique composant les pectines.

3.2.2. Cellulose

C'est la principale molécule structurelle des plantes. C'est un polyholoside homogène de glucose (un polymère de glucose). De structure fibreuse, elle est constituée de longues chaînes de molécules de D-glucose, reliées les unes aux autres par des liaisons β -1,4-glycosidiques. La réunion de plusieurs de ces macromolécules linéaires, parallèles, forme une fibrille, ou micelle, dont la cohésion est assurée par les liaisons hydrogènes qui s'établissent d'une macromolécule à une autre, à partir des groupements hydroxyles. La réunion de ces fibrilles constitue les fibres, forme sous laquelle se présente la cellulose. Son aspect varie avec la plante, sa maturité et l'organe considéré.

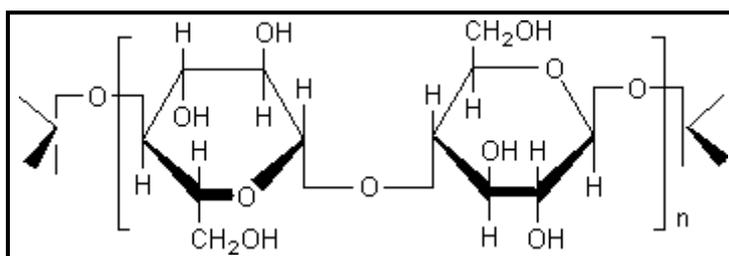


Figure 3 : Structure chimique de la cellulose (Jean-Blain., 2002).

La cellulose est une molécule très longue et rigide de formule $(C_6H_{10}O_5)_n$ (n compris entre 200 et 3000). Elle est formée de longues chaînes de molécules de D-glucose de B-D glucopyranose toutes reliées entre elles par des liaisons hydrogène (liaisons faibles) et dont les liaisons osidiques ne peuvent être rompues, au cours de la digestion, que par les enzymes bactériennes. La cellulose est le principal constituant de la paroi secondaire des cellules végétales, des tissus de soutien (collenchyme, sclérenchyme) et des vaisseaux du bois ou conducteur (xylème).

La cellulose ne peut être assimilée par l'être humain mais sa présence dans l'alimentation favorise le transit intestinal et protège l'organisme contre le cancer du côlon.

Les animaux herbivores utilisent en général des enzymes d'origine exogène, c'est-à-dire produites par les cellules de la flore intestinale pour digérer la cellulose.

Cellulose (paroi des végétaux)

polymère de β -glucose, non digestible
structure plane

...glc $\beta(1\rightarrow4)$ glc $\beta(1\rightarrow4)$ glc $\beta(1\rightarrow4)$

10 000 à 15 000 glc

D-glucopyranoses
enchaînés via des
liaisons $\beta(1\rightarrow4)$

Rôle de la cellulose

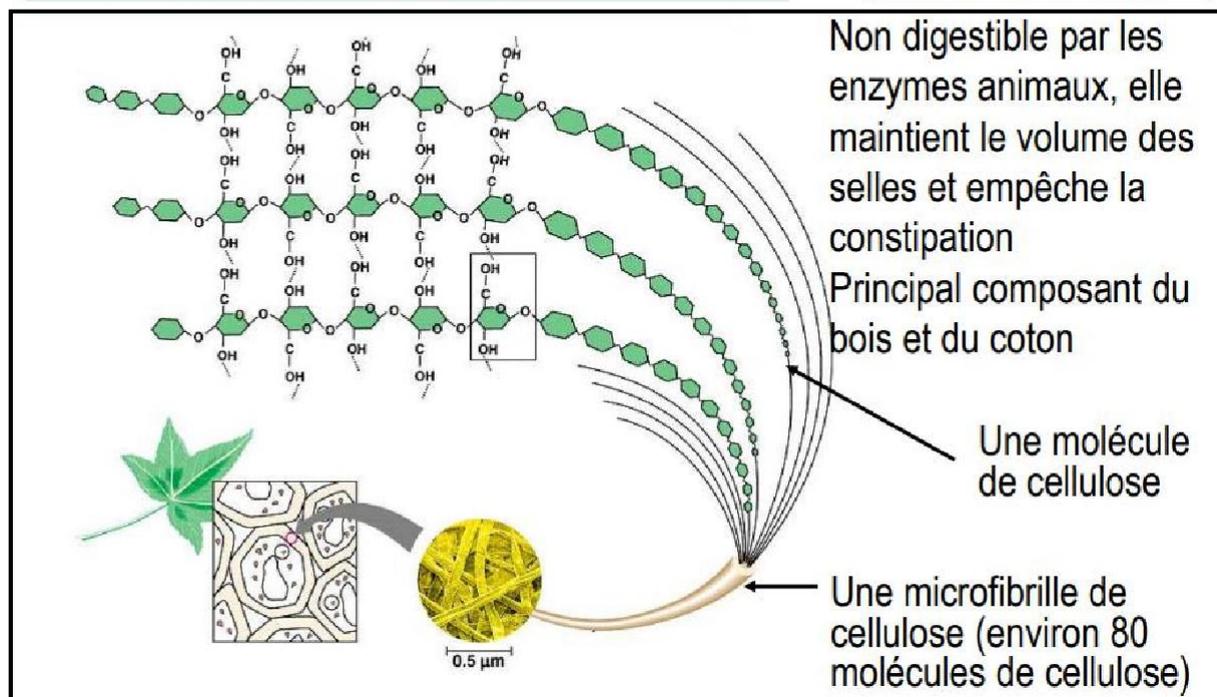
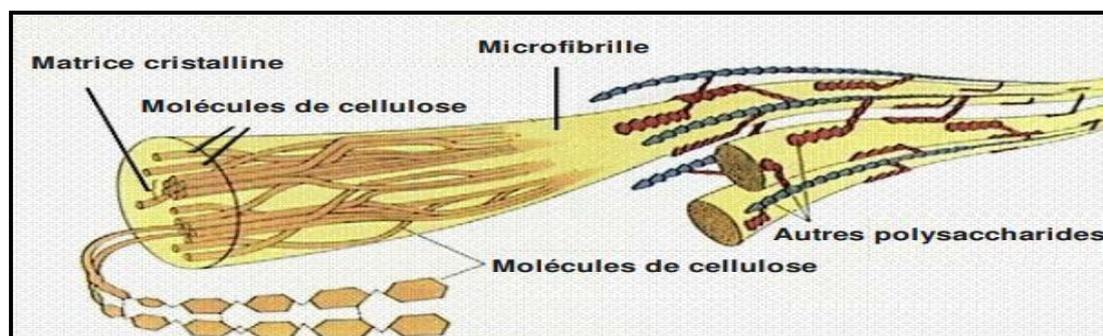


Figure 4 : Structure de la cellulose (Raaf., N et Griene., L. 2015).



Une microfibrille est composée de douzaines de molécules de cellulose qui s'assemblent en une matrice cristalline. Les microfibrilles peuvent interagir avec d'autres polysaccharides présents dans la paroi (hémicelluloses et, possiblement, pectines)

Figure 5: Microfibrilles de cellulose (Chavez Montes., R. A. 2008).

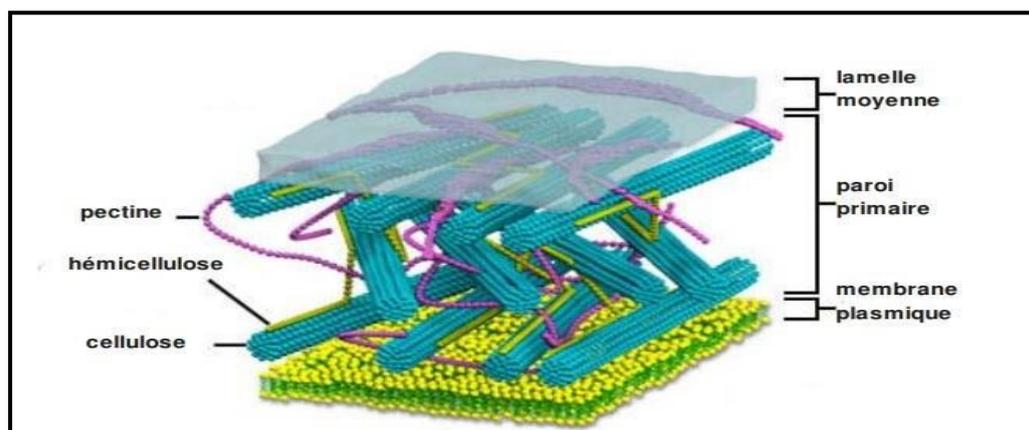
3.2.3. Hémicelluloses

Les hémicelluloses représentent, après la cellulose, le polysaccharide le plus abondant dans la nature. Elle constitue 30 à 45 % de la biomasse végétale terrestre formée essentiellement de chaînes de pentoses, qui sont les principaux constituants de la paroi primaire des cellules végétales (xylose, de quelques hexoses et d'acides uroniques).

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

Elles sont souvent associées à la lignine et sont moins digestibles que la cellulose vraie. Plus la plante vieillit, plus la teneur en hémicellulose augmente.

Les hémicelluloses sont un groupe de polysaccharides complexes qui se caractérisent par leur extractibilité de la paroi par des solutions alcalines. Elles diffèrent de la cellulose de par l'hétérogénéité de leur composition monosaccharidique. En général elles sont constituées de chaînes moléculaires plus courtes avec un degré de polymérisation souvent inférieur à 200.



La cellulose interagit avec les hémicelluloses, les pectines formant une matrice occupant le reste de l'espace. La zone de contact entre deux cellules est appelée lamelle moyenne.

Figure 6 : Modèle simplifié de la paroi primaire (Chavez Montes., R. A. 2008).

3.2.4. Substances pectiques

Les pectines forment un groupe de polysaccharides complexes qui ont comme caractéristique d'être extraits de la paroi par de l'eau chaude, des acides dilués, ... Ce sont les constituants essentiels de la lamelle moyenne à la base du « ciment » qui réunit les cellules entre elles. La structure principale des pectines est formée de chaînes faiblement polymérisées d'acides galacturoniques liés en α -(1→4), appelé acide poly galacturonique, sur lesquelles s'insèrent des résidus de L-rhamnose.

3.2.5. Lignine

La paroi des cellules végétales comprend également un composé non glucidique, la lignine. Cette substance, qui s'associe aux glucides pariétaux et dont la teneur augmente avec l'âge de la plante, est presque totalement non dégradable dans le tube digestif du ruminant.

Les **lignines** (du latin *lignum* qui signifie bois), sont des polyphénols, tridimensionnelles hydrophobes de haut poids moléculaire. Leur structure résulte de la copolymérisation de trois monomères aromatiques de type phénylpropène : l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique. **A la fin du développement cellulaire, la lignine incruste ainsi la cellulose et les hémicelluloses, ce qui assure la rigidité de la paroi.**

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

Les lignines sont difficilement dégradées, très résistantes à de nombreux agents chimiques et biochimiques; seules certaines bactéries et champignons, comme les Polyphores, sont capables d'assurer la lignolyse.

La lignine est un des principaux constituants du bois, le deuxième en importance après la cellulose. Surnommée la « colle naturelle du bois », elle est utilisée comme liant dans la composition de plusieurs produits. Une autre caractéristique de la lignine est qu'elle est tensioactive, c'est-à-dire qu'elle a la capacité de combiner et de stabiliser deux substances qu'on ne pourrait pas lier autrement.

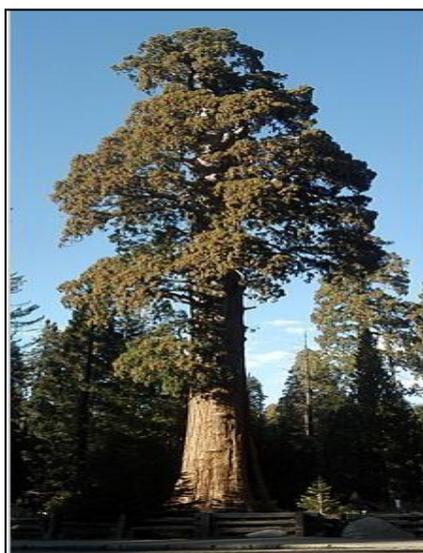


Figure 7 : Séquoia géant résiste à la hauteur grâce à la lignine (Anonyme 1 : Consulté le 14/11/2019)

3.2.6. Autres constituants

Les substrats ligno cellulosiques renferment également des lipides, des protéines ainsi que des substances de faible poids moléculaire, tels que les extraits et minéraux, spécifiques à chaque essence.

La paroi contient généralement entre 3 et 6% de protéines, souvent sous forme de glycoprotéines, dont les extensines. Les autres sont des enzymes telles que la peroxydase ou diverses glycosidases.

4. Matières azotées

Les matières azotées sont représentées par des protéines et de l'azote non protéique. Une protéine est constituée d'une longue chaîne d'acides aminés (AA). En alimentation, 20 AA différents sont pris en considération, dont pratiquement la moitié d'entre eux sont considérés

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

comme essentiels car ne pouvant être synthétisés par l'animal. Ils doivent donc être impérativement présents dans les aliments consommés.

Les protéines fournissent les acides aminés nécessaires pour le maintien des fonctions vitales, la croissance, la reproduction et la lactation. Les animaux non-ruminants ont besoin d'acides aminés préformés dans leur ration. Par contre, grâce aux microorganismes présents dans le rumen, les ruminants possèdent la capacité de synthétiser les acides aminés à partir d'azote non-protéique (ANP) une part substantielle de ces acides aminés sont digérés dans l'intestin. Des AA, tels que la méthionine et la lysine, sont cependant considérés comme « limitants » : leur synthèse via les microorganismes du rumen ne couvre pas toujours les besoins de la vache en production. L'azote non protéique comprend les peptides (chaînes d'AA limitées), les AA, l'urée et l'ammoniac (NH₃).

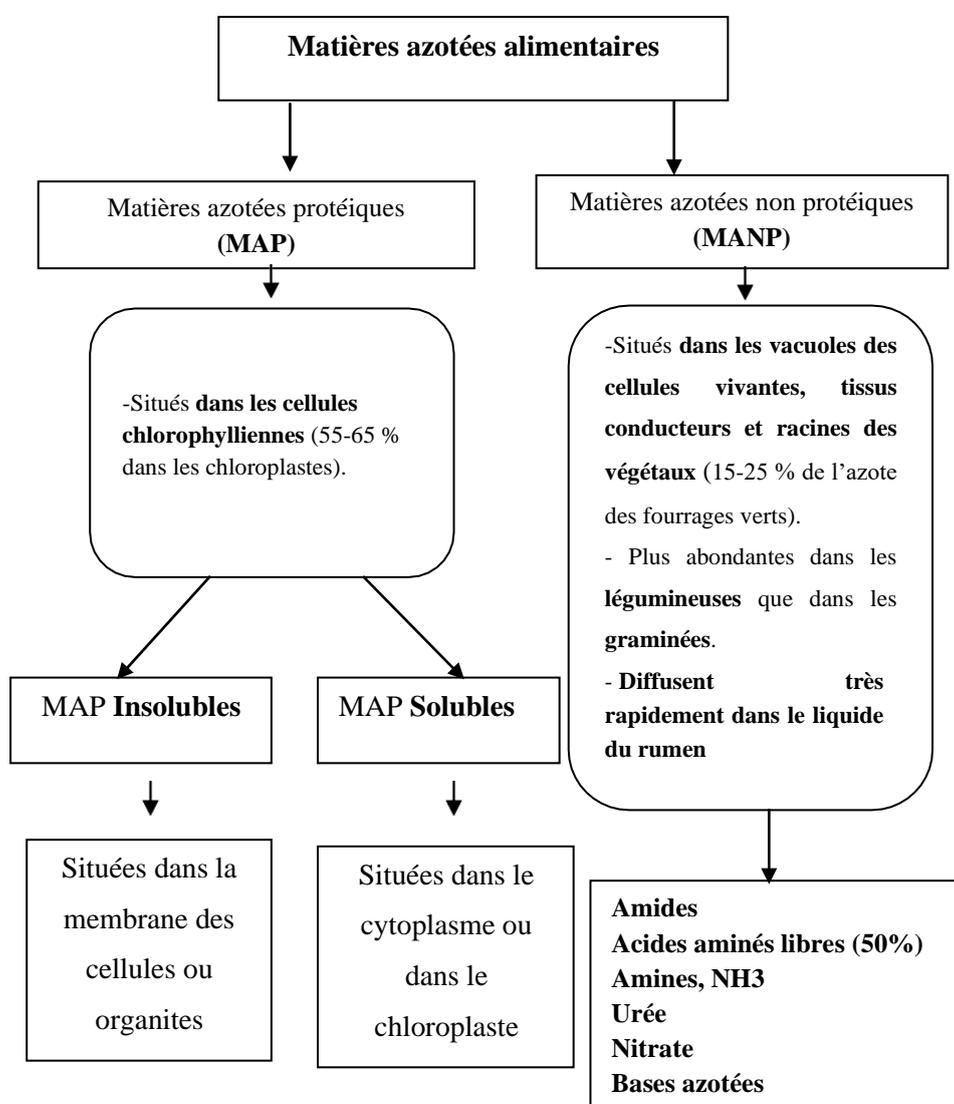


Figure 8 : Classification des matières azotées alimentaires (Jarrige, R. 1980)

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

5. Lipides

Les lipides sont également appelés matières grasses. Les principaux constituants lipidiques des végétaux sont en général des triglycérides, c'est-à-dire des molécules comprenant:

1 glycérol + 3 acides gras. Les matières grasses sont caractérisées par la nature des acides gras qui les composent. Ainsi, on peut classer les acides gras selon leur longueur :

- Acides gras volatils (AGV) avec 2, 3 ou 4 atomes de C
- Acides gras à courte chaîne (entre 5 et 10 atomes de C)
- Acides gras à chaîne moyenne (12 à 16 atomes de C)
- Acides gras à longue chaîne (18 ou plus de 18 atomes de C)

Les acides gras sont des acides carboxyliques à chaîne aliphatique hydrophobe, saturés ou non saturés. Les acides gras se différencient par la longueur de leur chaîne carbonée, mais aussi par le nombre, la position et la configuration spatiale des doubles liaisons.



Figure 9 : Configuration spatiale d'acide gras en Cis et en Trans

On peut également les classer en fonction de la présence ou de l'absence de double liaison sur leur chaîne carbonée :

*Acides gras saturés (sans double liaison) :

*Acides gras insaturés (avec 1 double liaison ou plus) :

Acide gras mono insaturé : possède 1 double liaison

Acide gras poly insaturé : possède plus d'une double liaison

Certains acides gras sont considérés comme « essentiels » pour toutes les espèces animales, ils doivent impérativement être apportés par l'alimentation car l'animal ne peut les synthétiser. Ils peuvent par contre être synthétisés par les microorganismes hébergés dans leur tube digestif. Ainsi chez les ruminants, cette synthèse s'opérant dans le rumen, il n'est pas indispensable d'apporter ces acides gras dans leur alimentation (acides linoléique et oléique sont les principaux acides gras insaturés essentiels des céréales).

RQ : Les lipides représentent 2 à 5 % de la plupart des aliments des ruminants.

6. Matières minérales

Les éléments minéraux sont présents dans l'organisme soit sous forme de sels (chlorures, carbonates, phosphates, sulfates) soit inclus dans des molécules organiques (acides nucléiques, hormones, hémoglobine). L'organisme des animaux renferme de 3 à 5% d'éléments minéraux. Cette proportion varie avec l'espèce, l'âge, et l'état d'engraissement.

Les éléments minéraux sont classés en deux groupes selon leur concentration dans les organismes des animaux :

- **Les éléments minéraux majeurs ou macroéléments**, présents en quantités relativement importantes et pour lesquelles l'unité de mesure est le gramme, ils représentent 99% des éléments minéraux de l'organisme

Ce sont le calcium(Ca), phosphore(P), magnésium(Mg), Potassium(K), sodium(Na), chlore(Cl), soufre (S).

- **Les éléments traces ou oligoéléments** présents en quantités très faibles. Leur unité de mesure est le milligramme, leur teneur est généralement exprimée en ppm (parties par million).

Ce sont le fer (Fe), le cuivre (Cu), manganèse (Mn), zinc (Zn), cobalt (Co), l'iode (I), sélénium (Se), molybdène(Mo)

RQ : L'efficacité de l'alimentation minérale dépend du respect de certains équilibres entre minéraux ou entre minéraux et vitamines principalement.

6.1. Fonctions des éléments minéraux

6.1.1. Formation du squelette

L'os est le principal réservoir minéral de l'organisme. L'ostéolyse et l'ostéosynthèse coexistent. Le dépôt des minéraux permet l'ossification qui a lieu lorsque l'accrétion l'emporte. Tandis que lorsque la résorption l'emporte, l'os se déminéralise et devient fragile. L'os adulte contient 25% de matières minérales (45% par rapport à la matière sèche) : 99% de Ca, 80% de P, 65% de Mg, 40% de Na et 5% du K de l'organisme.

Régulation hormonale du métabolisme phosphocalcique de l'os

Le métabolisme phosphocalcique de l'os est régulé par des actions hormonales mettant en jeu trois éléments :

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

- Un dérivé de la vitamine D3, 1,25 dihydroxycholécalférol ($1,25 \text{ (OH)}_2 \text{ D}_3$) est considérée comme une hormone dont sa production est contrôlée en fonction de la calcémie. Elle stimule la fixation de calcium et phosphore dans l'os.
- La parathormone (PTH) produite par les glandes parathyroïdes, favorise l'ostéolyse pour libérer le calcium osseux et stimule la production de $1,25 \text{ (OH)}_2 \text{ D}_3$. L'hypocalcémie stimule sa production par contre l'hypercalcémie la freine.
- La calcitonine (CT) produite par la glande thyroïde est antagoniste de la PTH en s'opposant à l'ostéolyse en favorisant le dépôt de calcium dans l'os et protège le squelette de la déminéralisation.

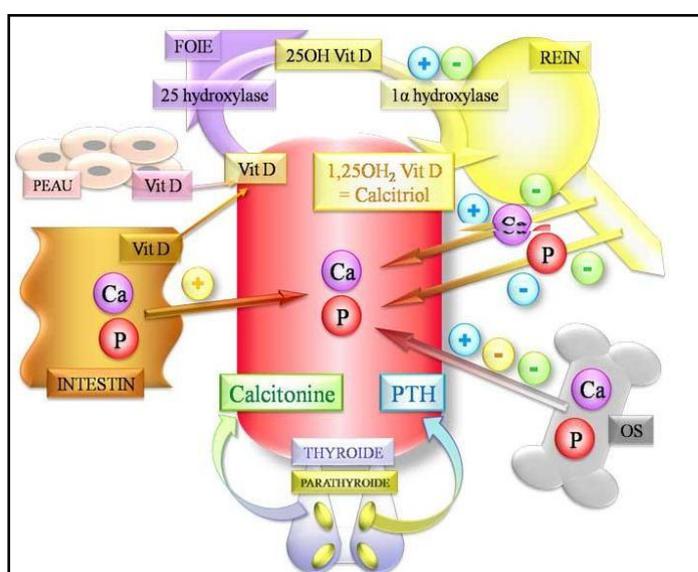


Figure 10 : Régulation hormonale du métabolisme phosphocalcique de l'os (Anonyme 2 : Consulté le 06/03/2020)

6.1.2. Fonctionnement de la cellule

Plusieurs minéraux interviennent dans le fonctionnement de la cellule notamment dans :

- Le transport de l'énergie
- L'excitabilité neuromusculaire
- Les paramètres physico-chimiques

6.1.3. Réactions biochimiques

Les minéraux participent à la régulation des réactions biochimiques, ils interviennent comme constituants ou activateurs d'enzymes, d'hormones et de vitamines. Exemple : le calcium nécessaire à l'activation de plusieurs enzymes digestives.

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

6.1.4. Micro organismes du rumen

Les minéraux exercent dans le rumen deux rôles d'abord en agissant sur certaines propriétés physico-chimiques de l'environnement (pH, pouvoir tampon) et en intervenant dans le métabolisme propre des micro-organismes.

6.2. Effet de Carence des macroéléments:

Les carences peuvent se manifester de façons très différentes, elles peuvent affecter le fonctionnement de l'organisme, le squelette de l'animal ainsi que les niveaux de performances.

Tableau 2 : Répartition des macro-éléments dans l'organisme, rôles, carences (**Drogoul et al., 2004**)

	Répartition/ organisme	Rôle	Symptômes
Calcium 1,3 à 1,8 % et Phosphore 0,8 à 1% (PV)	Ca : Squelette Plasma sanguin P : Abondant+++ tissus mous	- Formation du squelette et des dents - Constituant de molécules organiques surtout le phosphore (acides nucléiques, phospholipides, coenzymes), caséines,	-Diminution des productions -Perte d'appétit -Amaigrissement -Rachitisme -Ostéomalacie Baisse de fertilité Absence de chaleurs (non décelables) } Carence P
Magnésium 0,04 à 0,05% du PV	70 à 75% : Squelette	-Formation de l'os -L'excitabilité neuromusculaire -Réactions enzymatiques	- Les carences sont rares -Principalement nerveux (tétanie d'herbage chez la vache laitière) - Chez le veau (<0,11g/l de Mg dans le lait) provoque un ralentissement de croissance, tétanie, mortalité.
Sodium et Chlore	Localisation extracellulaire Na : 90% des cations du plasma sanguin ¼ du Na dans le squelette	-Régulation de la pression osmotique cellulaire. -Equilibres électrolytiques et acido-basiques -Synthèse de l'acide chlorhydrique du suc gastrique (chlore) -Absorption intestinale (Na)	Carence en Na : -Léchage -diminution de l'appétit -chute des productions
Potassium	Localisation intracellulaire Muscle : 300 à 400mg/100g (75% du P de l'organisme) Sang : 20mg/100g	-Contraction musculaire -Excitabilité neuromusculaire (antagoniste Ca et Mg)	Excès K/Na >10
Soufre	Constituant organique	-Constituant des acides aminés soufrés, cystine et méthionine, vitamine (biotine, thiamine) hormones (insuline) -synthèse protéique à partir de NH ₃ (microorganismes du rumen)	

Chapitre 1 : Constituants des aliments des ruminants

6.3. Oligoéléments

Ils jouent un rôle catalytique, notamment pour la synthèse de systèmes enzymatiques ou d'hormones.

Tableau 3 : Rôle de quelques oligo- éléments (Drogoul *et al.*, 2004)

Oligo éléments	Rôles essentiels
Fer	Constituant de l'hémoglobine et de la myoglobine
Cuivre	Intervient dans plusieurs systèmes enzymatiques
Cobalt	Constitue la vitamine B12
Manganèse	Formation du squelette
Iode	Constituant de la thyroxine (hormone de la glande thyroïde)
Zinc	Intervient dans plusieurs systèmes enzymatiques (respiration cellulaire)
Sélénium	Antioxydant

Tableau 4 : Proportions relatives des éléments minéraux dans un organisme de mammifère (Meschy., F. 2007)

Macroéléments	g/Kg	Oligoéléments	Mg/Kg
Calcium	16	Fer	70
Phosphore	10	Zinc	30
Potassium	2,5	Manganèse	3
Soufre	2,0	Cuivre	2
Sodium	1,5	Iode	0,4
Chlore	1,0	Sélénium	0,2
Magnésium	0,5	Cobalt	0,02

Chapitre 2 : Digestibilité

1. Digestibilité

En alimentation animale, la digestibilité est un critère qui définit le degré ou la vitesse auxquels une matière organique est digérée par un animal et absorbée, la portion qui est digestible assimilable. Ce qui est ingéré, l'ingesta est corrélé aux fèces permettant de définir le coefficient d'utilisation digestive (CUD) entre la matière organique utile et celle inutile ou peu digérée. En effet, les aliments ingérés ne sont pas absorbés en totalité, une partie des ingesta (**I**) traverse le tube digestif et se retrouvent dans les fèces (**F**). L'utilisation digestive des aliments est caractérisée par leur digestibilité (**d**)

On distingue la digestibilité réelle (**dr**) de la digestibilité apparente (**da**) :

1.1. Digestibilité apparente (da) : Est la proportion (I-F)/ I d'aliment qui disparaît dans le tube digestif.

$$da = \frac{I-F}{I} = \frac{\text{Quantité ingérée} - \text{Quantité excrétée dans les fèces}}{\text{Quantité ingérée}}$$

* La digestibilité est toujours inférieure à 1. La digestibilité peut s'appliquer à différents composants de la ration ou de l'aliment exemple:

MS (MS d), MO (MO d), MG (MG d), N (N d), énergie (Ed)

* Le Coefficient d'Utilisation Digestive (**CUD**), est le produit de la digestibilité par 100 exprimé en%

$$\text{CUD a (\%)} = da \times 100$$

$$\text{Exemple, si vous avez la } (da)_{\text{aliment X}} = \frac{1000 \text{ g} - 300 \text{ g}}{1000 \text{ g}} = 0,70$$

$$\text{Donc le CUD aliment x (\%)} = da \times 100 \\ = 0,70 \times 100$$

$$\text{CUD aliment x (\%)} = 70 \%$$

1.2. Digestibilité réelle (dr) : C'est la proportion d'aliment qui disparaît réellement dans le tube digestif. Elle est plus élevée que la digestibilité apparente (**da**).

$$dr = \frac{I-(F-Fe)}{I} = \frac{\text{Quantité ingérée} - (\text{Quantité excrétée dans les fèces} - \text{Quantité endogène})}{\text{Quantité ingérée}}$$

*Les fèces excrétées ont deux origines :

- Les ingesta (aliment ingéré).
- Les substances endogènes (sécrétions digestives- mucus- produits de desquamation de la paroi du tube digestif- d'origine microbienne).

2. Estimation de la digestibilité:

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la digestibilité apparente et réelle

2.1. Digestibilité apparente

2.1.1. Méthode in vivo : C'est une mesure directe sur un animal vivant, maintenu en cage (cage de digestibilité) ayant reçu un aliment déterminé. Les quantités d'aliments ingérées et les fèces rejetées sont pesées et analysées (on peut estimer également les différents constituants d'un ou plusieurs aliments).



Figure 11: Cage de digestibilité (Boccard, R et Boissau, J. M. 1958 ; Beckers., Y. 2010)

2.1.2. Méthode in sacco (ou in situ ou méthode des sachets de nylon) : La méthode in sacco nécessite l'emploi d'animaux munis d'une canule ruminale. Cette méthode consiste à renforcer dans des sachets de nylon ou polyester, l'aliment à tester. Les sachets sont ensuite suspendus dans le rumen de l'animal (rumen, réseau, intestin grêle) pendant une période variable soumise à la fermentation (dégradabilité *in sacco*). Les échantillons sont retirés, pesés et analysés, on parle d'animaux fistulés.



Figure 12 : Méthode in sacco, vache fistulée (Doreau., M. 2008b)

2.1.3. Méthode in vitro : Cette méthode consiste à simuler et à reproduire le processus de dégradation subi dans le tractus digestif de l'animal dans un tube de verre en présence de jus de rumen.



Figure 13 : Méthode in vitro « Rumen artificiel : Rusitec »
(Doreau., M. 2008b ; 2012)

2.2. Digestibilité réelle (dr)

2.2.1. Méthode physique

C'est la méthode où on utilise des isotopes radioactifs pour marquer les aliments et faire la différence entre les fèces d'origine alimentaire. Cette méthode d'analyse permet un dosage rapide, simultané et non destructif de plusieurs constituants organiques des échantillons, on parle d'une mesure du spectre dans le proche infra rouge des fourrages (La SPIR).

Chapitre 3 : Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants

1. Introduction

L'appareil digestif des ruminants est différent de celui des omnivores et des autres herbivores (cheval, lapin) : C'est l'estomac qui présente le plus de modifications puisqu'il est divisé en quatre poches : Les ruminants sont ainsi appelés : herbivores polygastriques. L'appareil digestif, qui va de la bouche à l'anus est constitué de deux ensembles : le tube digestif et les glandes annexes.

2. Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants (Bovin adulte)

2.2. Cavité buccale

La cavité buccale assure la préhension des aliments et la rumination mérycisme.

La langue est un muscle recouvert d'une muqueuse sèche qui permet la préhension de l'herbe au pâturage. Elle est longue et mobile.

La denture est caractérisée par l'absence d'incisives supérieures et de canines; Ce qui donne la formule dentaire suivante pour les bovins adultes : 0/4 I, 0/0 C, 3/3 PM, 3/3M.

Le condyle d'articulation permet des mouvements verticaux et latéraux.

2.3. Œsophage

L'œsophage est un tube qui va du pharynx au rumen (panse) en se rétrécissant (1 à 1,5 m de long). Un bovin peut s'étrangler avec un objet arrondi tel qu'une pomme. L'œsophage permet l'acheminement des aliments vers l'estomac à la vitesse de 35 à 40 cm/s.

2.4. Estomac

L'estomac tire son particularisme de sa composition quadri-estomatique (trois pré-estomacs et l'estomac final) découlant sur un très long processus de l'absorption de l'aliment jusqu'à sa transformation en excréments. Les trois pré-estomacs, agissant comme des tamis de plus en plus étroits, et visent à réduire progressivement la taille et l'état structurel des matières ingérées. Les ruminants possèdent trois pré-estomacs : Le réseau et le rumen, formant le réticulo-rumen et le feuillet. La caillette qui est le « véritable » estomac comparable à l'estomac des monogastriques, sécrète des sucs gastriques. Cet ensemble est très volumineux, il occupe une grande partie de la cavité abdominale et représente environ les deux tiers.

Chapitre 3 : Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants

Tableau 5 : Les différents segments de l'estomac des Ruminants (Meynadier *et al.*, consulté le 23/02/2020)

Nom du segment		Aspect de la paroi
Panse	Rumen	Papilles
Bonnet	Réticulum ou réseau	Alvéoles polygonales
Feuillet	Omasum	Lames parallèles
Caillette	Abomasum	Muqueuse sécrétrice

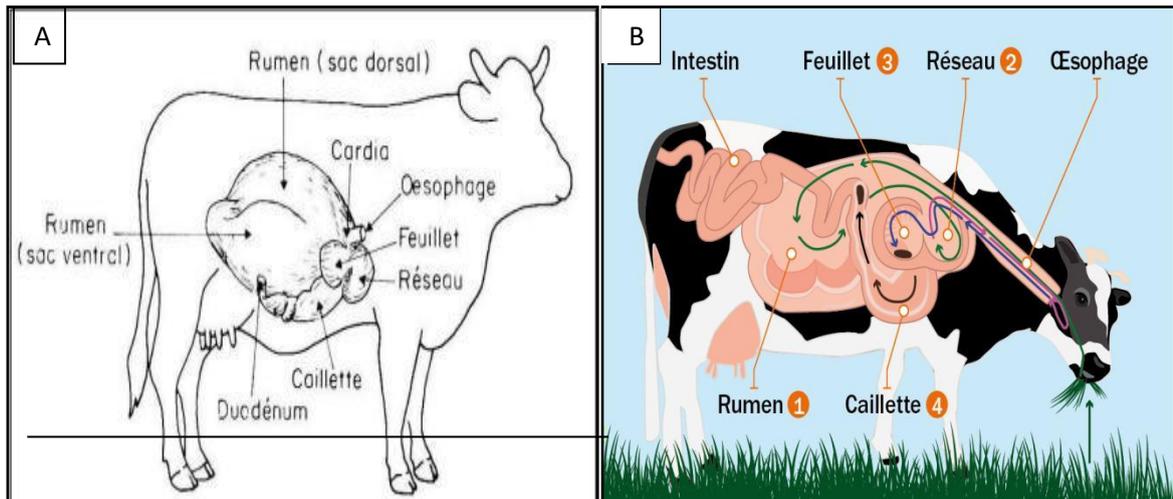


Figure 14 (A et B) : Anatomie des réservoirs gastriques des ruminants
(Thivend *et al.*, 1985 ; Rupert., R et Radigue., P.E. 2014)

2.4.1. Rumen (ou panse)

Le rumen est un vaste sac bilobé, allongé d'avant en arrière et légèrement aplati d'un côté à l'autre. Il est situé dans les parties gauche et ventrale de l'abdomen. Il s'étend du diaphragme au bassin. La musculature est importante et comporte des piliers charnus qui divisent le rumen en deux sacs. La muqueuse sécrétrice porte de nombreuses papilles aplaties (de 2 mm à 2 cm). Les papilles sont kératinisées mais l'épithélium est fin et très vascularisé (par exemple, elles sont plus hautes dans les zones en contact avec des liquides qui interviennent dans l'absorption des acides gras volatils (AGV), produits des fermentations microbiennes.



Figure 15 : Paroi du rumen (Léda., V. 2018) ; (anonyme 3 : Consulté le 23/10/2019)

Chapitre 3 : Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants

Il existe deux orifices, d'abord un orifice d'entrée très étroit mais très extensible, raccordé à l'œsophage : le cardia, et un orifice de **sortie très large entre la panse et le réseau** : le col de la panse. Ces deux orifices sont reliés par un repli en forme de gouttière pouvant, en contractant ses bords, relier l'œsophage au feuillet : C'est la gouttière œsophagienne ou sillon réticulaire (13 cm de long, 2 à 3 cm de diamètre)

Le rumen est le plus volumineux des réservoirs, il contient environ les trois quarts du contenu digestif total environ 150 l, dont 90 l de digesta chez les bovins. Ce contenu n'est pas réparti de façon homogène dans le rumen : en partie ventrale, on trouve une phase liquide, en partie intermédiaire une phase solide et en partie dorsale une phase gazeuse.

- **Phase liquide**, a pour origine l'abreuvement (50 à 100 l par jour), la salivation (80 à 200 l par jour) et l'eau contenue dans les aliments. L'eau est le constituant principal du contenu ruminal (85 %), et se trouve principalement dans la phase liquide contenant de fines particules en suspension (**particules alimentaires ou bactéries**) et des molécules en solution (**sels minéraux, petites molécules organiques**). Cette phase liquide permet l'imbibition des aliments. L'eau est essentielle aux réactions réalisées par les enzymes microbiennes.
- **Phase solide**, se concentre dans un amas fibreux en partie dorsale du rumen et a pour origine l'ingestion d'aliments.
- **Phase gazeuse**, comprend majoritairement les gaz issus des fermentations microbiennes. Ces gaz sont éliminés par éructation.

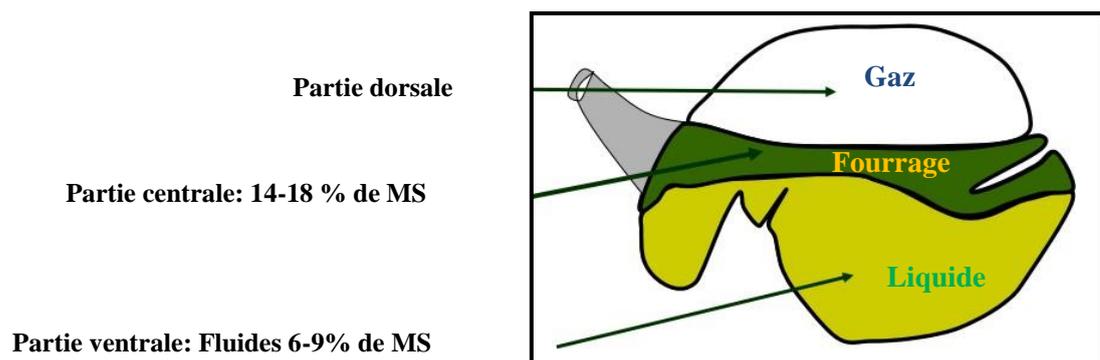


Figure 16: Représentation schématique du contenu du réticulo-rumen (Ferran., A. 2012)

Chapitre 3 : Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants

2.4.2. Réseau, ou *réticulum* ou bonnet

Le réseau est le plus petit et le plus crânial des pré-estomacs (petit réservoir : 12 l chez les bovins, 11 ovins, 1 à 2,3l caprins). Il est situé à proximité du diaphragme et du cœur (2 à 4 cm). Il est considéré comme un diverticule du rumen (situé entre le rumen et le diaphragme). Il a la forme d'un sac aplati dont la face diaphragmatique est moulée sur le diaphragme. L'œsophage est abouché dorsalement au réseau. Ce dernier est prolongé dorsalement par le rumen. Le sillon réticulaire (ou gouttière œsophagienne) est une dépression bordée de deux lèvres musculeuses d'environ 15 à 20 cm. Le fond du sillon réticulaire relie le cardia, placé sur le plafond de l'atrium.

Sa muqueuse est non sécrétrice et présente des alvéoles, sa paroi a une structure en nid d'abeille. D'ailleurs, il doit son nom à sa muqueuse réticulée et parsemée de papilles absorbantes qui jouent un rôle central dans la circulation des particules.

L'orifice de communication qui est étroit et contractile situé entre le **réseau et le feuillet**, joue un rôle capital dans le tri des particules qui doivent avoir une taille moyenne inférieure ou égale à 1-2 mm. Ainsi, les aliments solides sortant du rumen- réseau ne peuvent franchir l'orifice réticulo-omasal, restent séquestrés tant qu'ils n'ont pas atteint cette taille minimale.

RQ1 : Chez le veau, le lait ingéré passe donc directement de l'œsophage au feuillet.

RQ2 : Quand on parle de digestion dans le rumen, on induit toujours le réseau.

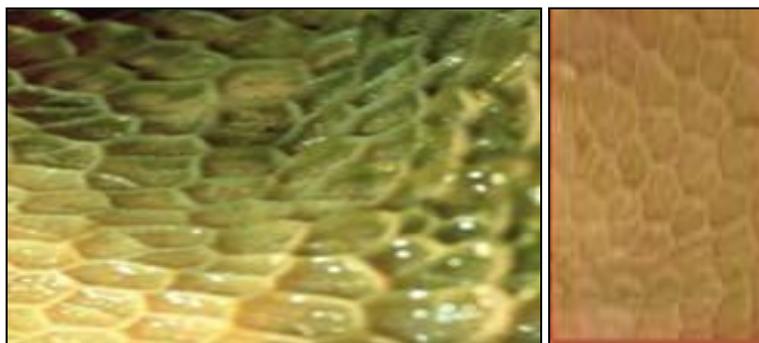


Figure 17 : Paroi du réseau (Léda., V. 2018) ;(anonyme 3 : consulté le 23/10/2019)

Chapitre 3 : Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants

	
<i>Régime Lait Foin/Paille Eau Sel</i>	<i>Régime Lait Paille Concentré/Herbe Sel Eau</i>
➤ <i>Production d'Acétate</i>	➤ <i>Production de Propionate/butyrate</i>
<ul style="list-style-type: none">• <i>Paroi fine et claire</i>• <i>Papilles peu développées</i>• <i>Volume ++</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Paroi épaisse et sombre</i>• <i>Papilles très développées</i>• <i>Volume +++</i>



Figure 18 : Epithélium du réticulo-rumen (Rupert., R et Radigue., P-E. 2014)

2.4.3. Feuillet ou omasum

Le feuillet est le dernier pré-estomac. Il est placé entre le rumen et la caillette. Il a la forme d'un ballon rond légèrement aplati (20l chez les bovins, 0,2l ovins, 1,2l chèvre). Sa face viscérale est accolée au rumen. Sa face pariétale est tournée à droite et en avant. Le feuillet est presque entièrement occupé par des lames parallèles, de hauteurs inégales, disposées dans le sens du transit alimentaire. Entre ces lames, on retrouve des aliments très fins et secs. Le canal du feuillet a un contenu liquidien. **L'orifice omaso-abomasal est plus large et plus dilatable que l'orifice réticulo-omasal. L'épithélium de la muqueuse du feuillet est de même nature que celui du rumen (sa muqueuse est non sécrétrice).** C'est au niveau du feuillet que se produit une grande partie de l'absorption de l'eau et des sels minéraux présents dans le contenu du rumen-réseau.



Figure 19 : Paroi du feuillet (Léda., V. 2018) ; (anonyme 3 : consulté le 23/10/2019)

Chapitre 3 : Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants

2.4.4. Caillette (ou abomasum)

La caillette est comparable à l'estomac des monogastriques, **sa muqueuse est sécrétrice** : elle synthétise le suc gastrique contenant de l'eau, de l'acide chlorhydrique et de la pepsine (C'est l'estomac chimique des ruminants). La caillette a la forme d'une poire, disposée longitudinalement, à droite du rumen (20l bovins, 2l ovins, 2 à 4l caprins). Elle est tapissée par une muqueuse peptique. Celle-ci est plus épaisse dans la partie pylorique que dans la partie fundique.

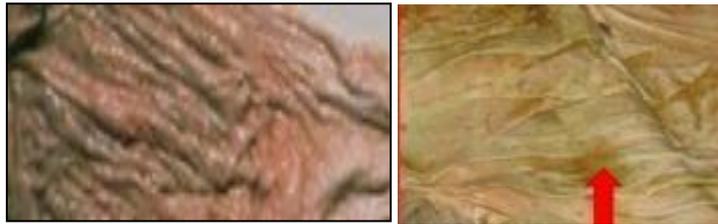


Figure 20 : Paroi de la caillette (Léda., V. 2018) ;(anonyme 3:Consulté le 23/10/2019)

2.5. Intestin

L'intestin est divisé en deux parties :

- **L'intestin grêle** : Il est très long 40 à 45 m / 70 l chez les bovins. Les trois portions de l'intestin grêle sont le duodénum, le jéjunum et l'iléon. Les mécanismes de la digestion enzymatique et de l'absorption dans l'intestin grêle sont les mêmes que chez les monogastriques. L'anse duodénale, qui constitue la première partie reçoit les sécrétions biliaires et pancréatiques.

- **Le gros intestin** : 10 m (30l bovins), il ne sécrète pas de sucs digestifs. Le gros intestin est composé de :

- *Cæcum 0,9 m (10 l bovins), le caecum a une forme cylindrique et légèrement sigmoïde. Son diamètre est d'environ 10 cm. Il est en continuité avec le côlon ascendant.

- *Côlon, il est toujours visible depuis le flanc. Il est situé médialement au duodénum descendant. Les anses du côlon se différencient aisément des anses de l'intestin grêle de par leur contenu très gazeux.

- *Rectum, continu par le canal anal

L'ensemble de l'intestin grêle et du gros intestin mesure environ 50 m chez le bovin adulte.



Figure 21: Intestin d'un bovin adulte (anonyme 3 : Consulté le 23/10/2019)

2.6. Glandes annexes

Elles présentent quelques particularités

- **Glandes salivaires** : Elles sont très développées et sécrètent 100-200 l/j de salive chez un gros bovin et 10l/j chez un ovin. Elles jouent un rôle important dans l'humidification du bol alimentaire, la sécrétion est continue mais elle augmente fortement pendant la mastication. La salive ne contient pas de ptyaline. Son pH égal à 8,2 constitue une véritable solution tampon.

- **Bile** : Elle n'a pas un rôle important chez les ruminants qui ingèrent peu de lipides



Figure 22: photos du système digestif d'un ruminant
(Anonyme 3: Consulté le 23/10/2019) ; (Cuvelier., C *et al.*, Consulté le 10/01/2020)

Chapitre 3 : Rappels anatomiques de l'appareil digestif des ruminants

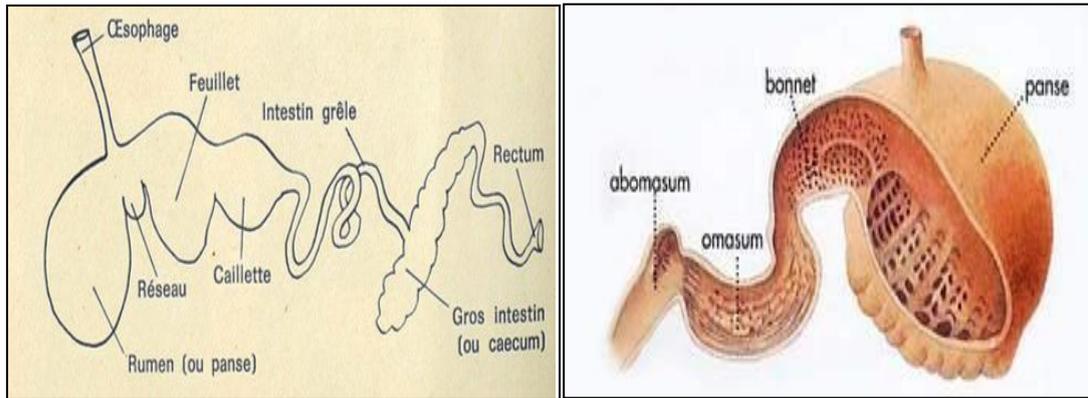


Figure 23 : Schéma de la constitution du système digestif d'un ruminant
(Anonyme 6 : Consulté le 24/03/2020)

1. Digestion

La digestion permet de transformer les aliments ingérés sous une forme assimilable par l'organisme. Les bovins ingèrent leur nourriture essentiellement pendant la journée, avec deux pics de consommation importants, au début et à la fin de la journée. Un bovin adulte peut ainsi arriver à consommer en une journée 10 % de son poids en herbe. Les bovins sont des ruminants qui possèdent quatre estomacs qui leur permettent de ruminer et de digérer la cellulose de l'herbe et des fourrages grossiers.

L'anatomie des ces réservoirs digestifs présentent des particularités, la physiologie présente également des caractéristiques spécifiques du point de vue mécanique et chimique. L'aptitude à l'ingestion et la digestion des fourrages chez les ruminants résultent de l'intégration de plusieurs phénomènes parmi lesquels :

1.2. Digestion mécanique

La mastication et l'insalivation des aliments sont les principales caractéristiques de la digestion buccale. Chez les ruminants, on distingue deux types de mastications:

1.2.1. Mastication ingestive

Une mastication dite ingestive est la première étape mécanique de la digestion et c'est une particularité des mammifères (oiseaux : gésier). Cette mastication est rapide et dure environ 8 heures, son rôle est triple:

- Réduire la taille des fourrages longs et permettre leur ingestion
- Libérer la fraction soluble des aliments pour favoriser les fermentations microbiennes
- Détruire la structure interne du végétal favorisant ainsi la colonisation microbienne.

*Les ruminants possèdent une dentition de type sélénodonte (dents dont la surface ressemble à un croissant de lune) très adaptée à la mastication de l'herbe (prémolaires et molaires).

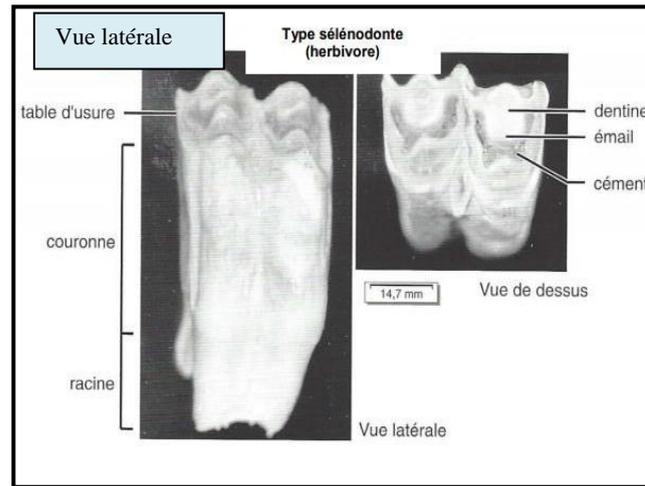


Figure 24: Dentition solénodonte (herbivores) (Anonyme 5 : Consulté le 28/01/2020)

*Une mâchoire inférieure mobilisée par les muscles masticatoires (masseters et temporaux). Une vache donne 40 000 coups de mâchoire par jour (10 000 pendant la prise de nourriture, 30 000 pendant la rumination).

*La langue est un organe musculeux très mobile, recouverte d'une muqueuse rose toujours humide. Elle forme le plancher de la cavité orale et participe à la vocalisation. Elle est couverte de papilles qui possèdent des bourgeons, sensibles à 4 types de goûts : amer, sucré, salé, acide. Le manque de diversité des saveurs est compensé par l'olfaction.

RQ: L'**agueusie** est l'absence totale de goût et la **dysgueusie** est une altération du goût. De nombreux médicaments altèrent le goût.

La langue participe à la mastication en replaçant les aliments sous les tables dentaires. Elle mélange l'aliment à la salive pour les transformer en un bol alimentaire (bolus = morceaux).

Au moment de la déglutition, la langue propulse le bol alimentaire en arrière dans le pharynx.

La langue est constituée de deux types de muscles : intrinsèques et extrinsèques (ces derniers permettent de modifier la position de la langue). Le frein de la langue (situé sous la face inférieure de la langue) maintient la langue sur le plancher et évite ses mouvements vers l'arrière (le cheval de course peut "avalier sa langue").

RQ : Chez les ruminants, la mastication des aliments se fait en 2 temps : rapidement au cours de l'ingestion et plus soigneusement au cours de la rumination (activité merycique). La mastication joue un rôle majeur chez les ruminants et le cheval. Elle est plus limitée chez les carnivores.

1.2.2. Mastication mérycique (rumination):

Les ruminants sont des herbivores capables de régurgiter leur nourriture afin de la mastiquer. Un bovin rumine de 8 à 12 heures par jour au pré. La rumination est lente et se réalise en différentes étapes, au cours desquelles les aliments font des allers-retours entre la bouche et une partie des quatre estomacs. Pour que la rumination commence, il faut qu'il y ait une prise alimentaire. L'animal ne va pas beaucoup mâcher son herbe, mais plutôt l'avaler sous forme de brins assez longs. Ces brins descendent dans l'œsophage et vont directement dans le rumen. Les deux premiers pré-estomacs (sac réticulo-ruminal) chez l'adulte ont un rôle de réservoir dans lequel s'accumule et séjourne l'herbe.

Le sac réticulo-ruminal contient après les repas, de 70 à 75 % de la matière sèche du tube digestif qui sera retenue à ce niveau de 30 à 70 h en moyenne.

Au niveau du rumen et du réseau règne une activité rythmique et synchrone dont les différentes parties se contractent successivement dans un ordre bien déterminé, se reproduisant avec une grande régularité; ce qui permet de faire de ces deux réservoirs **une seule unité fonctionnelle**.

Le réseau présente périodiquement une onde de contractions généralement double, la seconde étant plus puissante que la première. L'ensemble de cette onde de contractions dure environ cinq secondes et le phénomène se reproduit à peu près toutes les minutes. A cette période d'activité du réseau fait suite une phase de contraction du rumen généralement double également. Cette contraction du rumen est plus lente que celle du réseau et dure environ quinze secondes.

Chez l'espèce bovine, la paroi du réticulo-rumen se contracte pendant 15 à 20 secondes, toutes les minutes environ. Ainsi, le réticulo-rumen est un vaste fermenteur animé de mouvements qui vont faciliter les fermentations microbiennes.

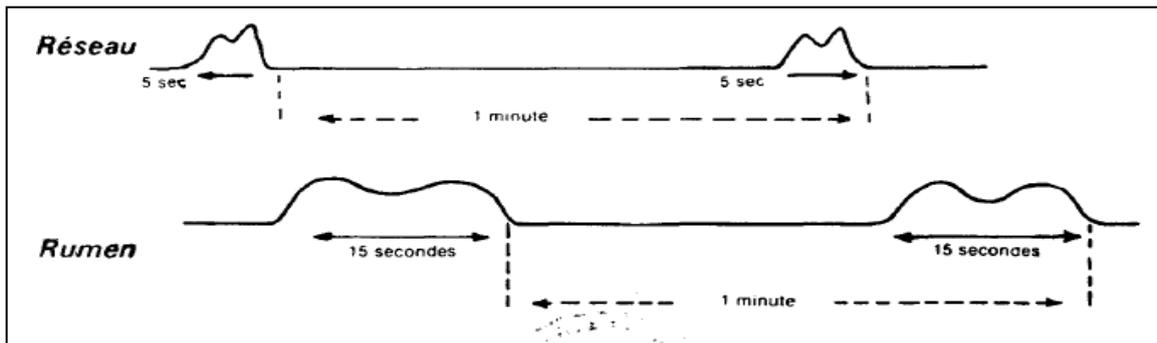


Figure 25: Représentation chymatique d'enregistrement des contractions du réseau et du rumen (Ribot., J.J. 1980)

➤ Régurgitation du bol alimentaire

Les mouvements de ces deux réservoirs brassent la masse alimentaire et facilitent son ensemencement bactérien. Ces mouvements participent également à la régurgitation physiologique du bol alimentaire qui va pouvoir être à nouveau mastiqué et insalivé : **c'est la rumination.**

Ce phénomène physiologique est périodique, lent, paisible et permet une bonne fragmentation du contenu assez grossier du rumen pour avoir de fines particules faciles à digérer par les microorganismes.

*Phase d'aspiration œsophagienne

Un animal qui va ruminer s'arrête de manger. Au cours de cette phase, le réseau se contracte, le contenu du rumen passe dans le cardia qui s'ouvre. L'animal inspire fortement (dépression intra thoracique) ce qui permet au contenu du rumen de remonter dans l'œsophage.

*Phase d'expulsion vers la bouche

Le retour des aliments dans la bouche est dû à une aspiration thoracique (inspiration profonde à glotte fermée) créant une dépression intra thoracique qui aspire littéralement les aliments vers l'œsophage. Le cardia s'ouvre temporairement et la motilité normale du rumen et du réseau tend non seulement à brasser les aliments, mais aussi à les pousser vers l'ouverture du feuillet ou du cardia. Une onde antipéristaltique de l'œsophage amène ensuite les aliments jusqu'à la bouche. Le contenu ruminal remonte de bas en haut le long de l'œsophage, une onde rétrograde due au passage du bol mérycique qui remonte vers la bouche. Elle est suivie par une nouvelle onde de déglutition normale correspondant au passage de l'excédent de liquide, que l'animal ravale. Cette onde antipéristaltique est accompagnée **d'une expiration profonde.**

➤ **Déglutition**

Au niveau de la gouttière jugulaire gauche, du tiers inférieur du cou, une onde descendante passe le long de l'œsophage, elle correspond à la déglutition de la dernière bouchée mastiquée. L'animal étend alors la tête sur l'encolure et exécute un mouvement respiratoire particulier qui se traduit par une brusque augmentation du diamètre transversal de l'abdomen et une légère diminution du diamètre transversal du thorax. Ces modifications sont dues à une brusque contraction du diaphragme, elles permettent la vidange vers l'omasum et contribuent à l'élimination des gaz de fermentation par la bouche : **c'est l'éructation.**

➤ **Mastication mérycique**

Les éléments grossiers de la ration ne pourront pas transiter par le sphincter du feuillet, ils seront préalablement réduits grâce au mécanisme de rumination ou mérycisme (comportement mérycique). La rumination fait partie intégrante du comportement alimentaire. Elle consiste en la régurgitation d'un bol alimentaire calibré prélevé dans le réseau atteignant la cavité buccale grâce à une onde antipéristaltique de l'œsophage. Les liquides contenus dans le bol sont immédiatement déglutis. Les aliments sont ensuite mastiqués et insalivés abondamment, puis de nouveau déglutis.

Chez le bœuf, la rumination commence selon les caractères de la ration de 30 à 60 minutes après le repas, chez les petits ruminants: 20 à 45 minutes après l'ingestion alimentaire.

Une vache peut mastiquer de 50 à 70 fois par minute et pendant 10 à 12 heures par jour, soit 40000 à 45000 mouvements de mâchoire par jour.

✓ **Rôles de la rumination**

Le rôle de la rumination est principalement double:

- Endommager la structure interne des digesta régurgités pour favoriser leur digestion;
- Réduire la taille des particules du matériel réfractaire de façon à ce qu'il puisse quitter le rumen. Ce dernier aspect serait la fonction essentielle de la rumination, tout en favorisant l'apport massif de salive pour tamponner le pH du milieu ruminal (seconde mastication et nouvelle insalivation).

➤ Phase de repos

Une onde de déglutition normale correspond au passage de l'excédent de liquide, que l'animal ravale. Le ruminant se met alors à mastiquer, lentement, régulièrement, la partie solide qui est restée dans la bouche. Enfin il avale et, après **un temps de repos de cinq secondes** environ, un nouveau cycle va recommencer.

Ces cycles de rumination ont lieu pendant un certain temps dit « période de rumination » à laquelle font suite des moments de repos. Les périodes se répètent 14 à 15 fois par jour chez la vache, un peu moins chez le bœuf et seulement 5 à 8 fois par 24 heures chez le mouton. En moyenne, les bovins passent de 6 à 10 heures par jour à ruminer.

➤ Insalivation

La salive est constituée d'un mélange de sécrétions dont la composition varie selon les glandes qui les produisent. C'est un liquide plus au moins alcalin, incolore ayant un pH de 6 à 6,7 chez les monogastriques, un **pH voisin de 8,1 chez le bovin et 8,6 chez le mouton**.

Le rumen n'ayant pas de sécrétion propre, la salive fournit environ 70% de l'eau qui entre dans cet organe et apporte la quasi-totalité des ions bicarbonate et du phosphate de Ca et P.

La vache adulte produit plus de 200 l de salive par jour. La salivation joue un rôle important en participant à la régulation des conditions physico-chimiques régnant dans le rumen et dans les pré-estomacs des ruminants (teneur en eau, acidité, vitesse de vidange, recyclage de l'azote).

En plus de l'eau qui est l'élément majeur (99%), **la salive contient des cations (K⁺, Na⁺), des anions (HCO₃⁻, Cl⁻, HPO₄²⁻) et de l'urée (10 à 35 ml / 100 ml)** qui peut représenter près de la moitié de l'azote total et **des AGV (acétate, propionate, butyrate)** provenant du sang.

La salive des ruminants (cheval compris) ne contient pas de ptyaline qui a une action sur l'amidon, dextrines....

✓ Rôle de la salive

- Facilite le transfert des aliments qui sont peu mastiqués au cours de l'ingestion vers le rumen, et favorise leur retour dans la bouche au cours de la rumination.
- Lubrifie les aliments grâce à sa richesse en mucus, au cours de la mastication et de la déglutition.
- Apporte chez les ruminants (aux microorganismes du rumen) certains nutriments (azote uréique, Mg^{2+} , HPO_4^{2-})
- Stabilise le pH du contenu ruminal entre les valeurs 6,0 et 7,0 correspondant aux conditions optimales de la croissance microbienne grâce pouvoir tampon (compte tenu de sa composition en électrolytes).

Les bovins, comme les ovins ont des petites glandes salivaires, ce qui est caractéristique des ruminants qui pâturent et semblent produire des quantités de salive comparables par kg de MS ingérée. La salive est sécrétée en quantité importante jusqu'à plus de 100 à 200 litres par jour chez un bovin et 10 à 15 litres par 24 heures chez petits ruminants, pour un équin 40 l / jour. Les caprins boivent moins que les ovins. Par contre, leur production de salive semble plus élevée.

➤ Brassage

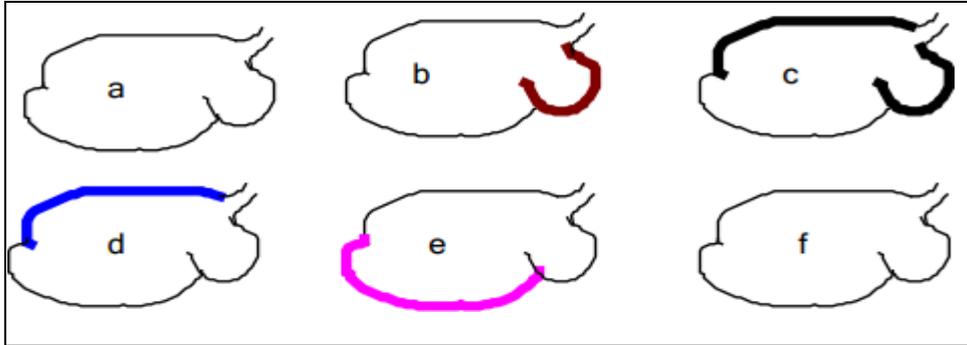
Après le passage de l'aliment dans le rumen, la paroi est irritée par les fibres végétales, ce qui déclenche des contractions rythmiques qui permettent de ramollir et homogénéiser le contenu au niveau du rumen. L'activité des deux réservoirs rumen- réseau est liée et on peut reconnaître une évolution cyclique de leurs mouvements dont les différentes parties se contractent successivement dans un ordre bien déterminé (cycle de 3- 5 minutes).

Chez l'espèce bovine, la paroi du réticulo-rumen se contracte pendant 15 à 20 secondes, toutes les minutes environ (voir figure 25 du même chapitre), ce qui va faciliter les fermentations microbiennes. L'intensité de ces contractions dépendent de la nature des fibres qui doivent avoir plusieurs millimètres de longs.

Le rumen est un fermenteur anaérobie où la digestion microbienne se déroule en continu. Les mouvements de ce réservoir **brassent la masse alimentaire** et facilitent **son ensemencement bactérien**.

Chapitre 4 : Digestion mécaniques des aliments chez les ruminants

Ces mouvements participent également à la régurgitation physiologique du bol alimentaire qui va pouvoir être à nouveau mastiqué et insalivé : **c'est la rumination**. Ensuite, ils permettent la vidange vers l'omasum. Puis ils contribuent à l'élimination des gaz de fermentation : **c'est l'éruclation**.



(a) : Rumen au repos, (b) : contraction du réseau, (c) : passage de l'onde de contraction du réseau à la partie antérieure du rumen, (d) : contraction de la partie postérieure du sac dorsal, (e) : contraction de la partie postérieure du sac ventral, (f) : rumen au repos

Figure 26 : Cycle de contraction du rumen réseau (Anonyme 3 : consulté le 23/10/2019).

1. Digestion microbienne

Chez les ruminants, les aliments sont soumis à des actions microbiennes (digestion chimique) avant de subir l'action des enzymes du tube digestif. Le rôle principal de ces actions microbiennes est d'assurer la dégradation de la cellulose qui représente une fraction très importante des aliments des herbivores. **À la naissance, le veau nouveau-né possède un tube digestif stérile.** Sa flore va se constituer progressivement **en 48 heures.** À partir de l'âge de 2 semaines, la consommation de fourrages en petite quantité va être à l'origine d'une première évolution du système digestif. Le rumen ainsi que sa flore bactérienne va se développer progressivement.

Le microbiote ruminal est composé par des bactéries, des champignons, des protozoaires (microfaune), et des archées. D'autres hôtes peuvent être aussi observés dans le rumen comme des virus. Ces microorganismes dégradent les glucides en acides gras volatils, transforment une partie des protéines ingérées et hydrolysent les triglycérides et autres esters, puis assurent l'hydrogénation de la majorité des acides gras insaturés. Le rumen abrite donc des conditions physicochimiques très particulières permettant le développement d'un microbiote anaérobie très actif (fermenteur anaérobie).

2. Digestion bactérienne dans le rumen et le réseau

L'ensemble réseau-rumen est le siège d'un véritable écosystème où une grande part des aliments ingérés par l'animal est valorisée. Le contenu du rumen et du réseau représente un véritable milieu de culture très favorable au développement de nombreux germes anaérobies. Il accueille un microbiote diversifié : environ 200 espèces de bactéries (10^{10} à 10^{11} bactéries par ml), des protozoaires (de 10^4 à 10^6 par ml) et des champignons (entre 10^3 et 10^5 zoospores par ml (les zoospores sont des spores mobiles flagellées participant à la reproduction de certains Eumycètes). On trouve également entre 10^7 et 10^9 particules de virus bactériophages par ml. Ce microbiote est en symbiose avec **son hôte : l'animal.**

2.1. Caractéristiques physico-chimiques du milieu

La population microbienne au niveau du réseau-rumen est adaptée à un milieu anaérobie :

- Riche en eau; alimenté par la salive et l'abreuvement (bouillon de culture)
- pH légèrement acide (entre 6 et 7) se maintient constant grâce au pouvoir tampon de la salive. La présence de quantités importantes de bicarbonates de soude et de phosphates bisodiques (salive) permet de neutraliser les acides qui se forment lors des réactions

métaboliques. Le pH baisse dans la période qui suit la prise de repas et augmente avant la prise alimentaire. Les principaux éléments responsables des variations de pH sont : les acides gras volatils (AGV) et l'acide lactique produits par les fermentations, les phosphates de la salive et l'ammoniac provenant de la protéolyse ou de l'uréolyse.

- Température maintenue entre 39° et 41 ° soit environ 1°C (au dessus de la température corporelle).
- Pression osmotique constante proche de celle du sang
- Présence de gaz réducteurs (CO₂, CH₄) (maintient des conditions d'anaérobiose strictes)
- Mouvements du rumen-réseau entraînent un brassage continu de la masse alimentaire, donc un ensemencement complet de tous les ingesta et une culture dans toute la masse.
- Alimenté en éléments nutritifs constamment renouvelés par l'apport d'aliments contenant glucides, protéines, lipides et sels minéraux.

2.2. Bactéries

Les bactéries représentent jusqu'à 50 % de la biomasse microbienne totale du rumen, composée essentiellement de bactéries anaérobies strictes non sporulées. Les trois quarts de ces bactéries sont fixés sur des particules alimentaires (hydrolysent les polymères pariétaux). Elles sont constamment éliminées par prédation des protozoaires ruminants ou évacués vers le feuillet et le reste du tube digestif. Mais ces pertes sont compensées par une croissance régulière de la population bactérienne.

Les bactéries sont une source importante de protéines microbiennes, qui fournissent aux ruminants 75 à 80 % des protéines métabolisables. La population bactérienne est variée allant de ceux qui digèrent les glucides (cellulose, hémicelluloses, pectine, amidon, sucres simple) à ceux qui utilisent les acides ou l'hydrogène comme source d'énergie. Le nombre de bactéries et les populations relatives des espèces individuelles varient avec le régime alimentaire de l'animal; par exemple, les régimes riches en aliments concentrés favorisent la prolifération des lactobacilles.

Les bactéries sont également importantes pour la production d'enzymes qui digèrent les fibres (cellulose, hémicellulose), l'amidon et les sucres. Elles peuvent être classées phénotypiquement selon des critères morphologiques (forme et groupement des bactéries, présence ou absence de flagelle, nature de la paroi, type de mobilité, etc.) ou selon des critères physiologiques (voies métaboliques, types de substrats utilisés, etc.). Cette dernière classification conduit aux groupes fonctionnels suivants : bactéries cellulolytiques, bactéries

hémicellulolytiques, bactéries pectinolytiques, bactéries amylolytiques, bactéries protéolytiques, bactéries utilisatrices de lactate.

Les bactéries du rumen sont généralement classées selon leur capacité à dégrader certains substrats et à les utiliser pour leur survie. En particulier, elles sont souvent distinguées en fonction de leur activité glucidolytique : fibrolytique ou amylolytique.



Figure 27 : Bactérie isolée du rumen < 5 μm
 10^9 - 10^{10} bactéries/ml de jus de rumen, environ 1 kg de bactéries
chez une vache, 10% de la MS du RR (**Ferran., A. 2012**)

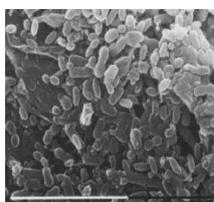


Figure 28 : Bactéries fixées sur la muqueuse du rumen 0,01 mm
(**Jouany., JP.1994**)

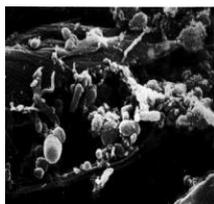


Figure 29 : Vue de différentes bactéries pénétrant dans une
particule végétale en cours de digestion dans le rumen

Enfin, on peut classer aussi les bactéries ruminales en quatre groupes, en fonction de leur environnement : les bactéries **vivant libres**, associées à la phase liquide ruminale ; les bactéries **associées avec les particules alimentaires** ; les bactéries **associées à l'épithélium ruminal** ; et les bactéries **attachées à la surface des protozoaires**.

- La phase solide du contenu ruminal contient environ 75% de la biomasse bactérienne totale, l'adhérence des bactéries de la phase solide est un préalable important à la fibrolyse. Les bactéries qui adhèrent aux fibres produisent un complexe d'enzymes (polysaccharidases et glucosidases) qui leur permet de digérer les parois cellulaires végétales.
- La phase liquide du rumen (bactérie libre) contient environ 25% et environ
- 1% se trouve au niveau de la paroi ruminale (appelé communauté épimurale) reconnu pour leur forte activité protéolytique et uréolytique.
- D'autres bactéries vivent liées à la surface des protozoaires (1-10% de la flore totale).

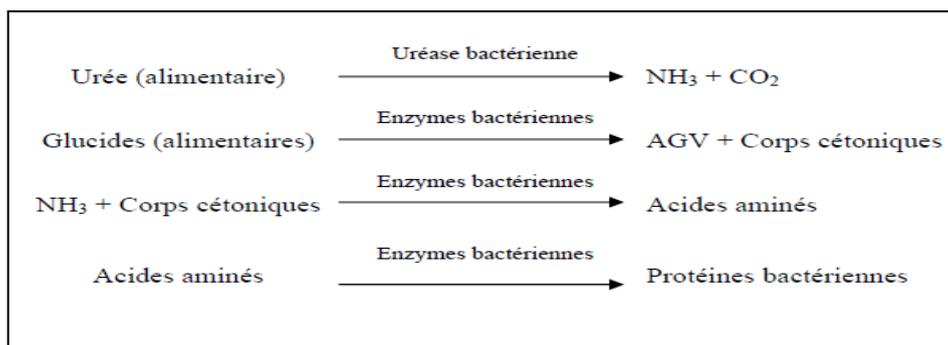


Figure 30: Séquences impliquées dans l'hydrolyse de l'urée et dans son incorporation par les bactéries ruminales (Satge., B. 1993)

2.3. Protozoaires

Les protozoaires ruminiaux représentent 10^6 organismes/ml de liquide ruminal et ils pèsent jusqu'à 50 % de la biomasse microbienne totale. Les protozoaires ciliés sont plus nombreux que les flagellés. Ce sont des organismes eucaryotes unicellulaires microscopiques. Ils sont de taille variable, 20 à 100 fois plus grands que les bactéries mais 10^4 fois moins nombreux. Le développement des protozoaires dépend du contact avec d'autres ruminants par la salive, l'air et la nourriture.

La plupart des protozoaires sécrètent des enzymes (protéolytiques, fibrolytiques, amylolytiques) participant à la digestion des particules ingérées.

Les protozoaires sont des prédateurs des bactéries et récupèrent les acides aminés, les peptides et les acides nucléiques bactériens pour les incorporer dans leur propre organisme (une seule cellule protozoaire peut avaler jusqu'à plusieurs milliers de bactéries en une heure, de sorte qu'ils jouent un rôle très important dans la stabilité de la population microbienne du rumen).

La nourriture influence la quantité et la composition en protozoaires. Ils sont très sensibles à la non nutrition et peuvent disparaître en 2 à 3 jours de diète. Si l'alimentation est riche en glucides, les protozoaires croissent rapidement, puis stockent l'amylopectine assurant une fermentation graduelle qui évite la formation d'acide lactique. Le changement alimentaire doit être progressif au risque d'entraîner la mort des ciliés, sensibles au pH acide. Les protozoaires **ont diverses activités**, ils améliorent la digestibilité, uniformisent la fermentation entre les repas, ils sont surtout importants pour les faibles rations.

- Les protozoaires cellulolytiques et hémicellulolytiques digèrent les particules végétales. Différents protozoaires (holotriches) ont un rôle positif dans la dégradation de l'amidon (mais moins rapide que celui des bactéries).

Chapitre 5 : Digestion microbienne des aliments chez les ruminants

La dégradation de l'amidon conduit à la formation d'acide butyrique, H₂, et CO₂ majoritairement et un peu d'acides propioniques et lactiques.

- Les protozoaires ciliés participent aussi au métabolisme glucidique dans le rumen car ils ingèrent les particules alimentaires et les digèrent à l'intérieur de leurs vacuoles.
- D'autres protozoaires peuvent consommer l'acide lactique, limitant ainsi les risques d'acidose.
- Certains types de protozoaires sont capables d'éliminer l'oxygène ayant ainsi un effet stabilisant sur l'anaérobiose.

Mais la plupart des protozoaires dégradent les protéines très efficacement et libèrent de l'ammoniac. Ainsi, ils utilisent une partie des protéines qui représentent près de 25 % des protéines microbiennes disponibles pour l'animal. Les protozoaires ciliés produisent une grande quantité d'hydrogène, qui est un substrat pour les méthanogènes.

Les protozoaires ciliés sont composés de deux groupes : les entodiniomorphes et les holotriches. Les hémicelluloses sont fortement dégradées par les entodiniomorphes alors que les holotriches fermentent plutôt les sucres solubles excepté le mannose et la glucosamine.



Figure 31 : Protozoaire 20-200 µm 10⁴ à 10⁶ /ml de jus de rumen environ 2 kg de protozoaires chez un bovin (Ferran., A.2012)



Figure 32: Plusieurs protozoaires ciliés du rumen appartenant au genre *Ostracodinium* sp. qui attaquent une tige végétale (Jouany., J.P. 2011)



Figure 33 : Le protozoaire cilié du rumen *Polyplastron multi vesiculatum* ayant ingéré de nombreux grains d'amidon (Jouany., J.P. 2011)



Figure 34 : Détail de l'ingestion d'une fibre végétale par le protozoaire cilié du rumen *Ostracodinium* sp. participant à la dégradation physique d'une tige de luzerne (Jouany., J.P. 2011)

2.4. Champignons

Les Champignons du rumen sont anaérobies stricts, ce qui est exceptionnel dans le groupe des champignons. Ils ne possèdent pas de mitochondries, ni de cytochromes et assurent uniquement la fermentation de tissus cellulotiques. Ainsi, ils colonisent les tissus lignifiés qui restent dans le rumen, cassent les structures en les dégradant et diminuent la taille des particules. Chez le ruminant adulte, la densité de champignons mesurée par des méthodes de cultures, est comprise entre 10^3 et 10^4 champignons / ml de contenu ruminal. Des densités similaires ont été observées via des techniques de biologie moléculaire. La quantité de champignons dans le rumen chez l'adulte peut varier fortement en fonction du régime alimentaire et du délai entre les repas. Appartenant principalement aux genres *Neocallimastix*, *Piromyces* et *Caecomyces*, les champignons du rumen sont souvent attachés aux fibres composant la phase solide et représentent environ 5 à 10% de la biomasse microbienne totale du rumen. Les champignons du rumen ont un fort potentiel fibrolytique grâce à une forte production de polysidases, qui permettent de dépolymériser la cellulose et les hémicelluloses, et d'hydrolyser les oligosaccharides libérés mais ne dégradent pas la pectine. Les produits terminaux générés par la fermentation des glucides sont du formate, de l'acétate, du lactate, de l'éthanol, du CO₂ et de l'H₂.

L'activité protéolytique des champignons est faible. Leur contribution à la dégradation des glucides cytoplasmiques est peu connue.

Les champignons apparaissent 8 à 10 jours après la naissance chez l'agneau, donc avant l'ingestion de nourriture solide. Ils disparaissent chez 80% des agneaux nourris par des concentrés, mais se stabilisent si la nourriture est peu hydratée. Chez l'adulte, le nombre augmente si l'alimentation est riche en fibres. Les bactéries cellulolytiques diminuent l'activité des champignons. L'élimination des champignons diminue la digestibilité et augmente la proportion de propionate.



Figure 35 : Champignons (moisissures) 20-200 µm 10^4 /ml
(Ferran., A. 2012)

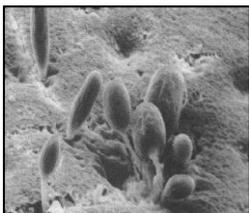


Figure 36 : Champignons fixés sur des pellicules de soja 0,1 mm
(Jouany., J.P. 1994)

Tableau 6 : Principaux champignons du rumen (Castillo-González *et al.*, 2014)

Champignons	Produits de fermentation
<i>Neocallimastix frontalis</i>	Lactate, formate, acétate, succinate, ethanol
<i>Piromyces communis</i>	Cellobiose
<i>Orpinomyces joyonii</i>	Glucose

2.5. Archées

Les Archées font partie du microbiote ruminal, connues principalement pour leurs activités méthanogènes, ils utilisent le dihydrogène produit lors de la fermentation des glucides par les bactéries **en anaérobiose** pour réduire le dioxyde de carbone en méthane. Cette réaction est nécessaire car la présence en excès de dihydrogène inhiberait les fermentations et donc le fonctionnement du rumen. Dans le gros intestin, ce sont principalement les bactéries acétogènes qui remplissent cette fonction.

Les Archées ne participent pas directement à la digestion ruminale. Elles forment une population peu abondante et probablement peu diversifiée et encore peu connue. Leur quantité a été évaluée entre 10^8 et 10^9 archées / g de contenu ruminal par des méthodes culturales.

Les archées méthanogènes dans le rumen sont attachées aux particules du rumen, à l'épithélium du rumen et associées aux protozoaires. L'abondance de leur présence au niveau du rumen varie en fonction de la nature des rations, des protozoaires présents, mais aussi en fonction des techniques utilisées pour leurs identifications.

1. Digestion dans le rumen-réseau

1.1. Digestion azotée

On peut différencier les matières azotées alimentaires en deux catégories : les protéines (MAP), qui peuvent être solubles ou non, et l'azote non protéique (MANP) qui regroupe des amides et des acides aminés libres (50% environ), ainsi que des bases azotées, des amines, du NH₃, de l'urée et des nitrates (voir chapitre 1). Dans les plantes fourragères, 75 à 85% de l'azote est sous forme de protéines, 15 à 25% sous forme d'ANP.

Les protéines fournissent les acides aminés nécessaires pour le maintien des fonctions vitales, **la croissance, la reproduction et la lactation**. La plupart des **fourrages et concentrés** sont des sources adéquates de **protéines**.

Les **microorganismes ruminiaux** dégradent une fraction des protéines alimentaires, **cette protéolyse** est principalement réalisée par les bactéries (activité des protéases bactériennes) dont environ 30% à 50% des bactéries isolées du rumen sont capables de lyser **les protéines solubles** chez les ruminants (principalement par les bactéries amylolytiques). La particularité des protozoaires est qu'ils lysent essentiellement **les protéines insolubles**, cette dégradation engendre tout d'abord des peptides puis des acides aminés et enfin de l'ammoniac et des acides gras. Les champignons interviennent dans une moindre mesure.

La dégradation des protéines se fait en étapes successives : chaque réaction permet de réduire la taille du peptide utilisé. Les acides aminés sont alors soit désaminés par des espèces bactériennes spécifiques, soit directement incorporés par les micro-organismes pour former leurs propres protéines. La désamination conduit à la formation de corps carbonés résiduels et d'ammoniac.

Les peptides de grande taille subissent une hydrolyse par des peptidases liées à la membrane extracellulaire des bactéries, cela produit alors des oligopeptides, des di-peptides, des tri-peptides et des acides aminés, qui seront ensuite absorbés par les bactéries.

Les peptides de petite taille sont assimilés et dégradés par les bactéries en acides aminés à l'aide d'enzymes intracellulaires. Ces acides aminés servent de facteurs de croissance aux bactéries cellulolytiques.

Les acides aminés, d'origine alimentaire ou produits de l'hydrolyse des protéines, sont soit désaminés en NH₃ et en AGV, soit incorporés dans les protéines bactériennes.

Chapitre 6 : Digestion des constituants alimentaires chez les ruminants

Quand la production d'ammoniac est supérieure à son utilisation, il sera véhiculé et transformé dans le foie en urée, cette partie de l'urée est alors recyclée par la salive ou par diffusion à travers la paroi du tube digestif. L'uréogénèse nécessite beaucoup d'énergie (ATP).

L'absorption d'ammoniac est conditionnée par le pH (pH élevé entraîne une absorption rapide, par contre un pH bas entraîne une absorption lente) et par sa propre concentration dans le rumen-réseau (50-80 mg/ 100 ml de jus de rumen).

L'urée est le produit final du métabolisme des protéines dans le corps et elle est normalement excrétée par les reins et éliminée par les urines et le lait chez la vache laitière. Chez les monogastriques, l'urée est entièrement perdue dans les urines. Contrairement aux ruminants, qui possèdent un mécanisme pour conserver l'azote lorsque leur ration est déficiente. Ainsi l'urée retourne au niveau du rumen et suit un cycle rumino-hépatique où les bactéries peuvent en faire usage et constituer une réserve d'azote (environ 50% de l'urée est synthétisé par le foie).

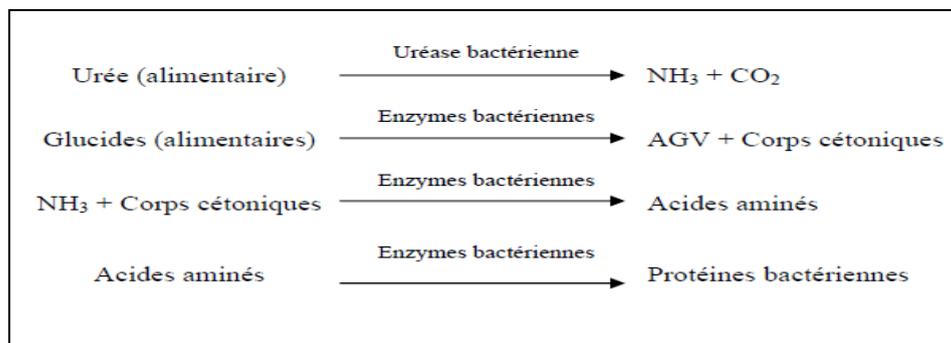


Figure 39: Séquences impliquées dans l'hydrolyse de l'urée et dans son incorporation par les bactéries ruminales (Satge., B. 1993)

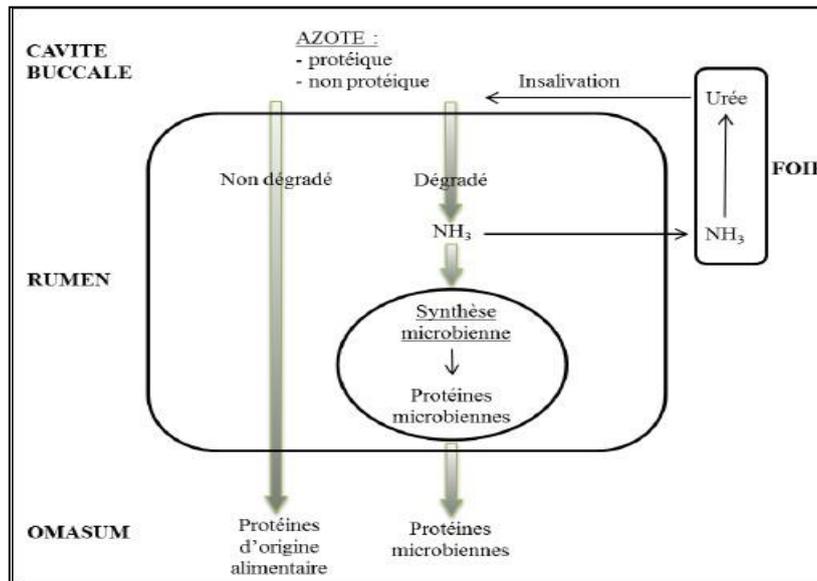


Figure 40 : Le métabolisme ruminal de l'azote (Dusart., C. 2014).

La résistance des protéines alimentaires à l'action des microorganismes ruminants dépend précisément de la nature de la protéine. Les protéines végétales crues (telles que celles présentes dans les fourrages) sont ainsi généralement très dégradables, celles ayant subi un traitement par la chaleur le sont moins.

Les matières azotées échappant à la dégradation dans le rumen-réseau sont constituées uniquement de protéines. Cette fraction variable de protéines qui échappe à la dégradation ruminale se compose principalement de **protéines insolubles**. Ainsi les protéines d'origine microbienne et les protéines alimentaires non dégradées dans le rumen seront ensuite évacuées vers le reste du tube digestif. Leur digestion est similaire à celle rencontrée chez les monogastriques.

Lorsque la quantité d'ammoniac est insuffisante pour les besoins des microorganismes, la digestibilité des aliments tend à diminuer. Par contre, trop d'ammoniac dans le rumen entraîne un gaspillage d'azote et la possibilité d'intoxication et la mort dans le cas extrême.

1.2. Digestion des glucides

Le microbiote ruminal et du réseau possède une large activité enzymatique pour hydrolyser les constituants glucidiques fibreux (cellulose, hémicelluloses, pectines) et l'amidon de la ration. Les micro-organismes s'attachent aux particules alimentaires et secrètent des enzymes (hydrolytiques microbiennes) qui permettent de rompre les liaisons entre les oses simples qui composent les polymères complexes (**c'est l'hydrolyse**) libérant ainsi des unités de glucides simples ou oses (hexoses ou pentoses) principalement du glucose, du fructose, du xylose et

Chapitre 6 : Digestion des constituants alimentaires chez les ruminants

des acides uroniques. Les oses simples issus de l'hydrolyse sont ensuite fermentés pour donner les composants utilisables par le métabolisme de l'animal, principalement les AGV.

Les glucides pariétaux ne peuvent pas être hydrolysés par les enzymes glycolytiques sécrétées par le tube digestif. Ces dernières ont une action α -glycosidase mais non β -glycosidase. Cependant, ils peuvent être dégradés par les enzymes sécrétées par le microbiote ruminal, capable de produire des β -glycosidases.

La dégradation des constituants pariétaux se fait de la manière suivante:

*Cellulose : 3 types de cellulases agissent en synergie

- Endo β 1-4 glucanase : attaque la cellulose pour former la cellooligosaccharide
- Cellobiosidase : Attaque l'extrémité non réductrice pour former l'unité de cellobiose
- β glucosidase : Hydrolyse les **cellooligosaccharides** et les **cellobioses** pour donner du **glucose**

*Hémicellulose : xylanases dans de nombreuses bactéries

* Pectines Hydrolyser par des enzymes pectinolytiques

La digestion de l'amidon se fait par des bactéries amylolytiques. Les glucides sont **fermentés** par les microorganismes du rumen et vite **métabolisés** afin de produire **de l'ATP nécessaire au métabolisme microbien**. La fermentation est réalisée en deux étapes consécutives :

D'abord, la transformation des oses simples en acide pyruvique (**métabolite intermédiaire**) Celui-ci subit une dégradation ultérieure, qui va aboutir à la formation d'un mélange d'AGV qui sont absorbés à travers l'épithélium des papilles ruminales et à travers les parois du feuillet et du réseau et constituent la principale source d'énergie pour l'animal (fournissent 60 à 80 % de l'énergie totale pour besoin à l'entretien). Au cours de cette fermentation, il y a formation de différents AGV produits dans le rumen, leur proportion varie en fonction du régime alimentaire de l'hôte. D'une manière générale, un aliment riche en cellulose conduit à une production de:

-**Acide acétique (C2)** représente jusqu'à 70% des AGV produits, en pourcentage molaire. L'acide acétique est un important fournisseur d'énergie par le cycle de Krebs via l'acétyl CoA. Il n'est pas glucoformateur. Il permet la synthèse des lipides corporels et des matières grasses du lait.

-**Acide propionique (C3)** représente près de 20% des AGV produits. L'acide propionique est l'acide gras volatil glucoformateur par la néoglucogenèse. Il donne aussi du glycérol et des acides gras longs.

Chapitre 6 : Digestion des constituants alimentaires chez les ruminants

-Acide butyrique (C4) représente environ 10 à 15% des AGV produits. Une ration riche en amidon aboutit à une augmentation de la proportion C3 qui peut atteindre 30%. L'acide butyrique est produit en faible quantité par rapport aux autres AGV. Il sert essentiellement à la synthèse des acides gras courts et moyens de la matière grasse.

-AGV mineurs 2-5 %.

Tableau 7: Influence du régime alimentaire sur la composition du mélange d'AGV dans le rumen de la vache laitière (Jarrige *et al.*, 1995)

Composition en AGV (%)			
	Acide acétique C2	Acide propionique C3	Acide butyrique C4
Foin de graminées	72	17	7
Foin (44%) + orge (56%)	61	30	8

L'acide lactique est un intermédiaire de cette chaîne de dégradation, du CO₂, du CH₄ et de la chaleur sont également produits au cours de ce processus. Les gaz produits lors des fermentations, le CO₂ et le CH₄ sont éliminés par éructation, une vache évacue approximativement **300 à 400 g de gaz/jour**.

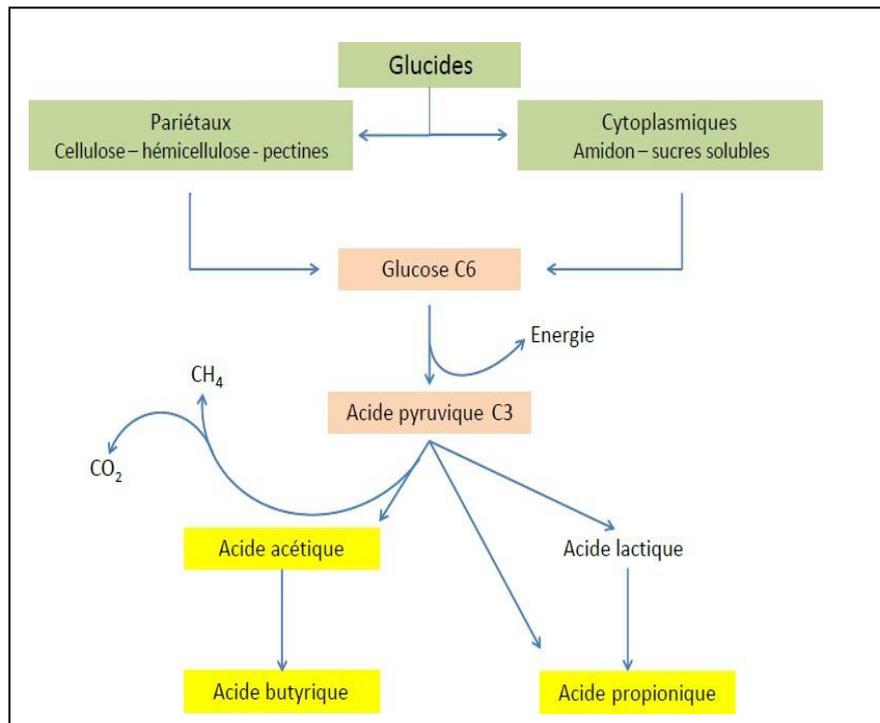


Figure 41: Schéma de la digestion des glucides dans le rumen (Cuvilier *et al.*, consulté le 10/01/2020)

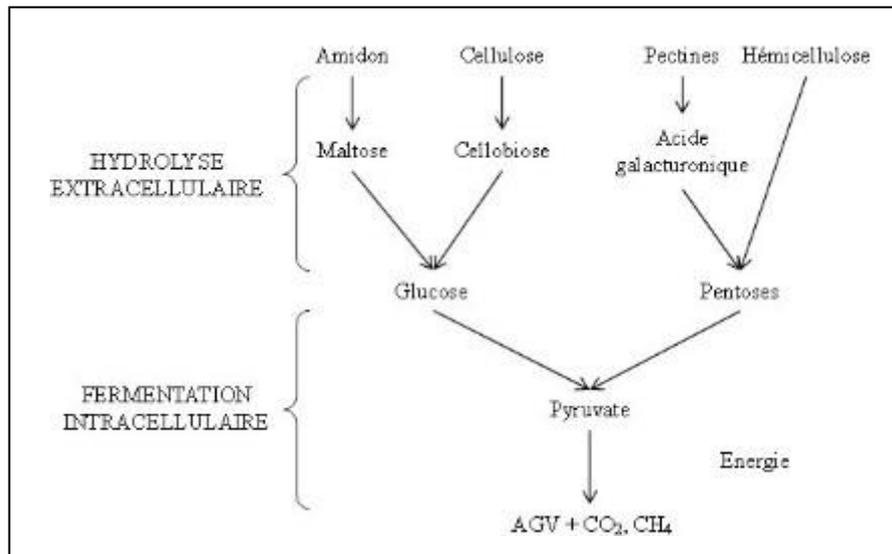


Figure 42 : La dégradation et l'utilisation des glucides par les bactéries ruminales

(Meynadieret al., consulté le 23/02/2020)

1.3. Digestion des lipides

Les lipides ne représentent généralement que de 2 à 5% de la plupart des aliments des ruminants, ce qui est relativement peu par rapport aux teneurs en glucides et en matières azotées. Ils sont en général apportés dans la ration sous forme estérifiée, soit sous forme de triglycérides dans les aliments concentrés, soit sous forme de glycolipides et de phospholipides dans les fourrages verts (60-70% des acides gras totaux).

Les lipides sont constitués d'acides gras non saturés en C18 : Acide linoléique dans les plantes fourragères.

Le métabolisme lipidique dans le rumen est caractérisé par l'existence de deux phénomènes concomitants, d'une part une lipolyse des triacylglycérols alimentaires suivie d'une hydrogénation des acides gras (environ 80% à 92% des acides linoléiques et linoléiques sont hydrogénés dans le rumen), et d'autre part une synthèse lipidique réalisée par les microorganismes du rumen.

Les lipides alimentaires sont hydrolysés par les microorganismes du rumen, ce qui permet la production de glycérol et d'acides gras libres. Le glycérol formé est rapidement fermenté en AGV, alors que les acides gras insaturés sont fortement remaniés par les microorganismes du rumen.

Chapitre 6 : Digestion des constituants alimentaires chez les ruminants

Les acides gras libres, fixés aux particules alimentaires quittent le rumen, passent dans la caillette, puis dans l'intestin grêle, où ils sont digérés et absorbés.

Les microorganismes du rumen synthétisent des lipides microbiens, caractérisés notamment par la présence d'acides gras ramifiés. Lorsque ces microorganismes quittent le rumen et passent dans la caillette, ils sont tués et désintégrés par le suc gastrique. Ceci permet la libération des lipides microbiens, les acides gras libres microbiens rejoignant le pool d'acides gras libres pour subir la digestion et l'absorption intestinales.

Le degré de saturation des AG a des conséquences directes sur la nutrition et la santé des consommateurs de produits issus de ruminants. En effet, il a été montré, chez l'Homme, que les AGS (acides laurique, myristique et palmitique) ont un rôle procarcinogène et pro-athérogène alors que les insaturés (acides oléique, polyinsaturés oméga 3) ont un rôle anti-carcinogène et anti-athérogène.

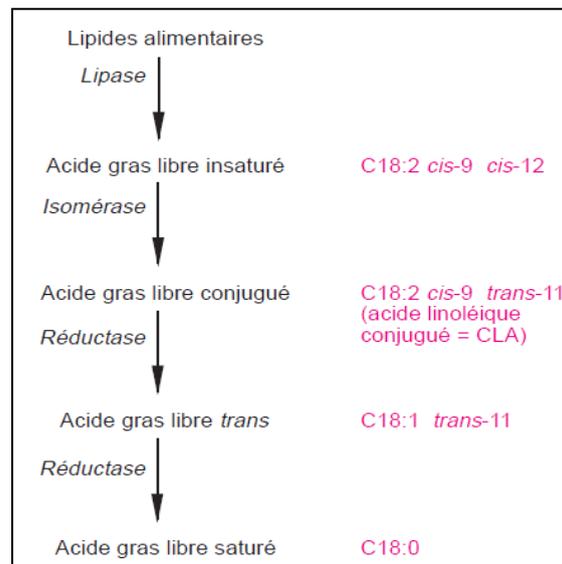


Figure 43 : Lipolyse et hydrogénation des acides gras dans le rumen (Sauvant., D et Bas., P. 2001)

1.4. Minéraux

Les macro-éléments et les oligo-éléments se trouvent sous des formes chimiques variées dans les aliments. La forme sous laquelle ils se trouvent conditionne leur absorption au niveau du tube digestif.

Chez les non ruminants, c'est tout l'intestin grêle et une grande partie du colon qui sont le siège de l'absorption. Chez les ruminants, ce sont le feuillet et les intestins. L'absorption des vitamines dépend de leur solubilité, ainsi les vitamines hydrosolubles sont absorbées en même temps que la solution d'électrolytes. En revanche, les vitamines liposolubles (A, D, E, K) se font avec les lipides.

Chapitre 6 : Digestion des constituants alimentaires chez les ruminants

De nombreuses interactions existent entre les minéraux. Ainsi, au niveau de l'intestin grêle, l'absorption du Ca est corrélée positivement à la concentration en phosphore inorganique, mais négativement à celle en magnésium.

L'absorption du calcium est limitée lorsqu'il est présent dans l'aliment sous forme d'oxalates de calcium.

Enfin, l'absorption de certains éléments peut également être modulée par le statut physiologique de l'animal en cet élément. Par exemple, l'absorption intestinale du Ca est augmentée lorsque les concentrations en calcium dans le sang sont faibles et ce, grâce à la sécrétion de vitamine D active.

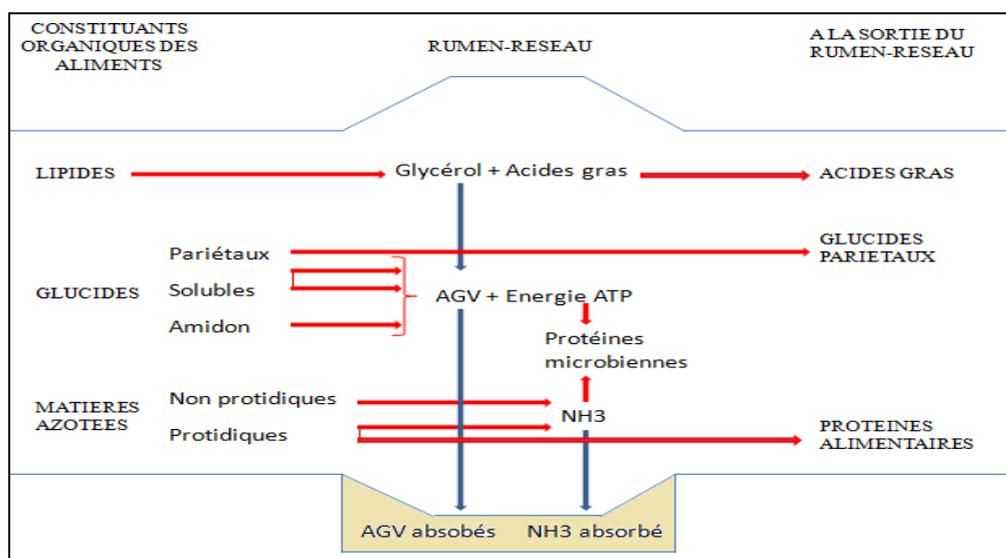


Figure 44 : Schéma résumant la dégradation des constituants organiques des aliments dans le rumen-réseau (Boye., M. 2014)

2. Digestion dans le feuillet

D'une capacité d'environ 10 litres, le feuillet constitue une zone de transition entre le rumen-réseau où la digestion est initiée par des fermentations et la caillette, où la digestion est essentiellement enzymatique. Le feuillet est dépourvu de sécrétions digestives mais la présence de nombreuses fines lamelles permettent des échanges d'eau et de sels minéraux se traduisant par une augmentation de la teneur en matière sèche du contenu. Le feuillet fonctionne comme un filtre : les gros brins d'herbe ne peuvent pas descendre, seules les particules de moins de 2 mm de long peuvent traverser le feuillet. Ainsi, il régularise le transit digestif et prépare le repas de la vache à la digestion vraie qui se fera dans la caillette. C'est le lieu aussi d'importante absorption d'eau et de sels minéraux surtout le sodium et le potassium substances contenues dans la "bouillie" d'herbe et de micro-organismes.

Le sodium et le phosphore sont récupérés dans le sang et retourneront dans la panse par l'intermédiaire de la salive. Le reste des acides gras volatils peut aussi être absorbé environ 50% des AGV qui pénètrent dans le feuillet. Ils représentent la source majeure d'énergie pour l'animal ainsi la motricité du feuillet a pour but d'assurer une absorption d'eau et un émiettement mécanique des aliments.

3. Digestion dans la caillette

Elle correspond à l'estomac des monogastriques. En forme de poire, elle se termine par le sphincter pylorique (20l bovins, 2l ovins, 2 à 4l caprins)

Les digesta arrivent librement dans la caillette et y séjournent très peu environ une demi heure jusqu'à 1 heure de temps. La caillette sécrète de l'acide chlorhydrique et de nombreuses enzymes digestives, le pH est bas en moyenne 2-3. Les bactéries et les protozoaires sont tués par l'acidité du milieu.

Le suc gastrique est riche en pepsine et ne contient pas de lipase. Il y a une lyse des parois bactériennes et une dissociation des bactéries fixées et des particules grâce au rôle important du lysozyme présent chez les ruminants. La caillette digère ainsi la majorité des graisses (lipides) et les protéines végétales qui ont échappé à la fermentation dans la panse. La caillette digère aussi les protéines que les bactéries ont formées dans la panse. Cela représente de 0,5 à 2,5 kg de protéines par jour, à partir de l'herbe ingéré.

4. Digestion dans l'intestin grêle

Après la caillette, les digesta progressent rapidement dans les parties antérieures de l'intestin grêle. Le pylore étant toujours entrouvert, laisse un passage continu du contenu de la caillette vers le duodénum.

Les mécanismes de la digestion et de l'absorption dans l'intestin sont les mêmes que chez les monogastriques, mais les substances qui y pénètrent sont différentes.

Les enzymes pancréatiques principalement les nucléases sont plus sécrétées chez les ruminants que chez les monogastriques et interviennent avec d'autres substances enzymatiques dans la digestion des cellules microbiennes. La sécrétion de suc pancréatique est continue, avec des phases d'augmentation lors de la prise d'aliments. Cette sécrétion et l'activité des divers enzymes dépendent beaucoup de la nature de l'alimentation. L'ensilage augmente l'activité de la trypsine et de l'amylase, alors que la paille diminue l'activité liposique et trypsique, mais augmente l'activité amylolytique.

La bile des ruminants a une couleur verte marquée, car elle contient beaucoup de biliverdine.

La sécrétion biliaire a le même rôle et se fait comme chez les monogastriques

L'intestin présente des mouvements pendulaires, de segmentation rythmique, péristaltiques et antipéristaltiques. Ces mouvements sont plus ou moins accusés selon les portions intestinales intéressées, mais leur rôle est toujours de brasser, mélanger le contenu intestinal pour en favoriser l'absorption et en assurer le transit jusqu'à formation des fèces.

4.1. Glucides

Presque la totalité de l'amidon est dégradée dans le rumen-réseau (90-95%), le reste qui n'est pas dégradé est hydrolysé en maltose puis en glucose dans l'intestin grêle. Cela concerne les rations mixtes riches en grains de maïs et de sorgho. Les glucides pariétaux ne sont pas dégradés au niveau intestinal.

L'apport alimentaire de glucose fournit en moyenne 5% de l'énergie absorbée puisque celui-ci est transformé dans le rumen en AGV.

4.2. Matières azotées

Le transit des digesta est très rapide au niveau intestinal, ainsi la digestion et l'absorption ont lieu dans le deuxième tiers de l'intestin grêle mais elles sont faibles dans l'iléon.

Il y a deux types de matières azotées, alimentaires et microbiennes (protéines vraies), constituées à 80% de protéines assez bien pourvues en acides aminés indispensables, sauf en acides aminés soufrés.

L'azote microbien représente plus de la moitié du flux d'azote entrant dans le duodénum (50-90%).

L'absorption est le passage de matériaux de la lumière intestinale vers le milieu extérieur via les cellules absorbantes. Elle a lieu principalement dans l'intestin grêle, dont la paroi présente une série de replis qui en accroissent considérablement la surface. La digestion des protéines au niveau intestinal n'est pas complète car il reste une partie qui échappe à la dégradation notamment celles des protéines d'origine bactérienne et endogène et une petite partie des protéines alimentaires.

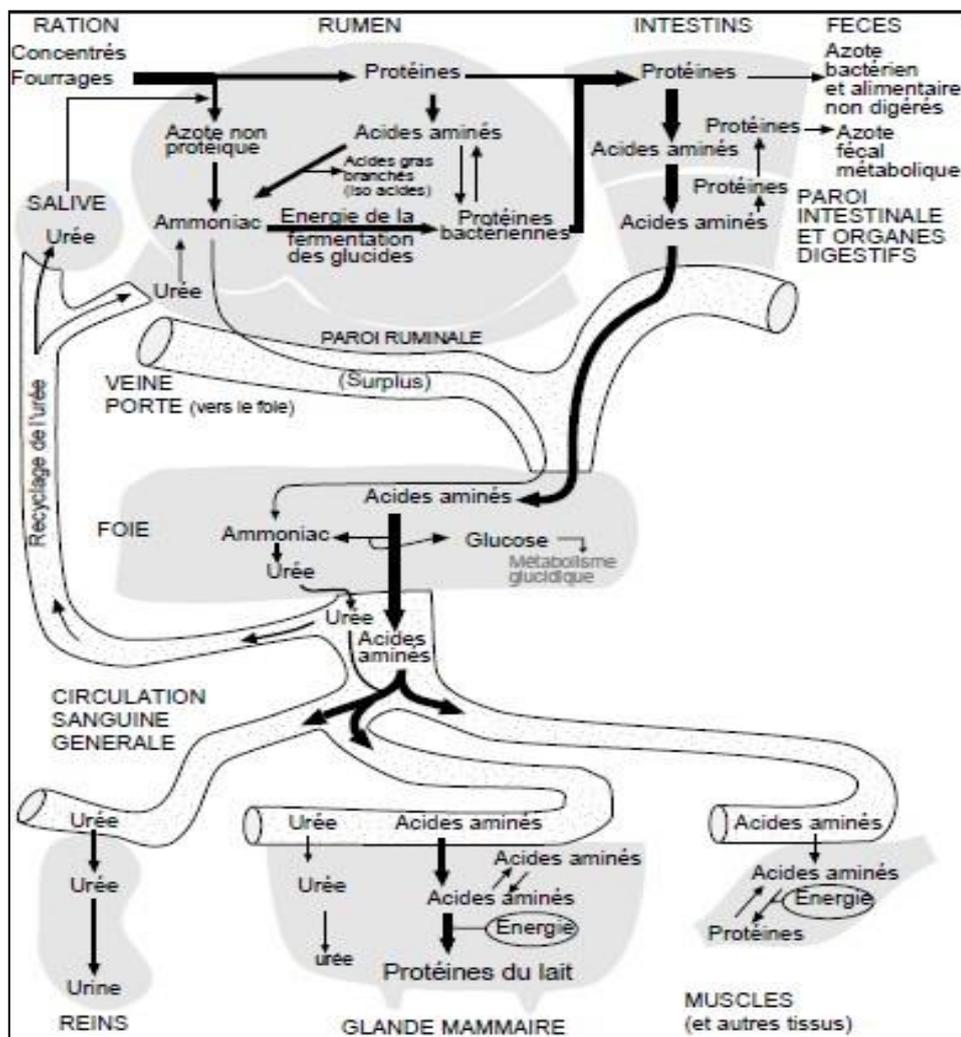


Figure 45 : Vue générale du métabolisme protéique chez la vache laitière (Michel A., Wattiaux : Consulté le 26/11/2020)

4.3. Lipides

Les microorganismes du rumen synthétisent des lipides microbiens, caractérisés notamment par la présence d'acides gras ramifiés. Lorsque ces microorganismes quittent le rumen et passent dans la caillette, ils sont tués et désintégrés par le suc gastrique. Ceci permet la libération des lipides microbiens, les acides gras libres microbiens rejoignant le pool d'acides gras libres pour subir la digestion et l'absorption intestinales.

Cette digestion au niveau intestinal se fait grâce à la bile et au suc pancréatique. La bile apporte des phospholipides facilitant la mise en solution micellaire des acides gras insaturés. Les lipides apportés par la bile au niveau du duodénum entraînent une augmentation de la quantité des acides gras insaturés, phospholipides et de cholestérol.

Le milieu duodéal étant particulièrement acide (pH de 2,0 à 2,5), les acides gras non estérifiés se présentent sous forme protonée, c'est-à-dire non ionique, ce qui maintient l'absorption des lipides à la surface des particules. Les phospholipides sont, quant à eux

distribués de façon équitable entre la phase aqueuse et la phase solide du digesta duodéal. Les sels biliaires permettent la séparation des acides gras libres et leur solubilisation dans les structures micellaires. Ce transfert vers la phase micellaire se produit progressivement au fur et à mesure de la progression du bol alimentaire dans le tractus intestinal. Les phospholipases pancréatiques assurent l'hydrolyse des phospholipides et les lipases pancréatiques hydrolysent les triacylglycérols d'origine microbienne ainsi que ceux provenant des huiles alimentaires protégées. Le pH optimal d'activité des lipases étant situé entre 7,5 et 7,8, l'hydrolyse de ces triacylglycérols n'est réalisée que distalement, après la partie moyenne du jéjunum.

4.4. Eau, minéraux, vitamines

L'eau et les électrolytes qui entrent dans l'intestin grêle avec les digesta ou les sécrétions digestives sont réabsorbés.

Les vitamines B sont libérées par la digestion des corps microbiens et absorbées dans l'intestin grêle en quantités bien supérieures aux besoins des ruminants.

L'absorption des vitamines est liée à leur solubilité : les vitamines hydrosolubles telles que du groupe B, sont absorbées en même temps que la solution d'électrolytes, les vitamines liposolubles (ADEK) sont absorbées en même temps que les lipides.

L'absorption du Ca se fait dans la première moitié de l'intestin grêle

La capacité d'absorption de l'intestin est beaucoup moins limitée pour le phosphore que pour le calcium

La plupart des oligo éléments, notamment le cuivre, le zinc et le manganèse sont absorbés en majeure partie dans le duodénum et la partie supérieure du jéjunum.

4.5. Produits finaux de la digestion absorbés dans l'intestin grêle

- Glucose en très faible quantité
- Acides aminés provenant des protéines alimentaires non dégradées dans le rumen et surtout des protéines microbiennes
- Acides gras longs en faibles quantité
- Eau, des minéraux et des vitamines (vitamines du groupe B)

5. Gros intestin

Les résidus de la digestion dans l'intestin grêle arrivent par intermittence dans le gros intestin. Chez les ruminants, la durée totale de transit des aliments dans le tube digestif est influencée par le séjour prolongé dans les pré-estomacs. Avec des aliments marqués, l'excrétion commence au maximum 24 à 25 heures après l'ingestion et dure encore 60 à 70 heures, 80 % des aliments sont digérés et leurs déchets excrétés 90 heures environ après l'ingestion. L'excrétion totale peut n'avoir lieu qu'une dizaine de jours après le repas chez un bovin.

Le volume des fèces dépend du régime alimentaire, le bœuf élimine de 20 à 40 kg d'excréments chaque jour selon sa ration; le mouton excrète 2 à 3 kg de crottes par jour. La fréquence de ces défécations dépend beaucoup du volume et de la consistance des excréments à éliminer.

Il n'y a pas d'enzymes dans le gros intestin, mais il y a une reprise de la digestion microbienne, à ce niveau elle reste moindre que celle observée dans le rumen. Parmi les activités réalisées au niveau du gros intestin :

5.1. Absorption d'eau et des minéraux

C'est au niveau du gros intestin où la majeure partie de l'eau et des minéraux sont absorbés

- *Macro éléments : Le phosphore, calcium, magnésium et chlore. Le sodium est fortement absorbé à ce niveau contrairement au potassium où l'absorption se fait d'une manière plus faible.

- *Oligo-éléments: Zinc, cobalt, cuivre, manganèse.

5.2. Glucides

L'amidon non digéré (sorgho, maïs) dans l'intestin grêle est en partie dégradé par les microorganismes du gros intestin. Les glucides pariétaux qui ont échappé aussi aux fermentations microbiennes peuvent quant à eux subir une seconde fermentation dans le côlon. L'absorption des acides gras volatils issus de la fermentation microbienne de l'amidon et des glucides pariétaux a lieu surtout au niveau du rumen réseau. La partie qui échappe à cette dégradation peut aussi avoir lieu au niveau du caecum. L'activité cellulolytique du contenu du caecum est moins égale à celle du rumen. La capacité amylolytique du gros intestin n'est pas très élevée également.

L'absorption d'ammoniac issu de fermentations microbiennes et d'acides aminés microbiens en faible quantité a lieu également dans le caecum.

5.3. Protéines

Au niveau du gros intestin, il y a aussi une activité microbienne avec protéolyse et synthèse microbienne, mais la quantité d'acides aminés absorbés à ce niveau est très faible.

Le petit intestin est le deuxième organe en importance pour le processus de la digestion protéique. Le chyme se déplace rapidement dans le duodénum et le jéjunum. Par contre, l'iléon possède un temps de rétention supérieur. C'est à ce niveau que les protéases sont les plus actives car le pH devient moins acide.

Les composés alimentaires non absorbés à la fin de l'intestin grêle constituent la fraction alimentaire indigérée. Ces composés transitent vers le caecum puis vers le côlon où une partie est fermentée par la flore endogène.

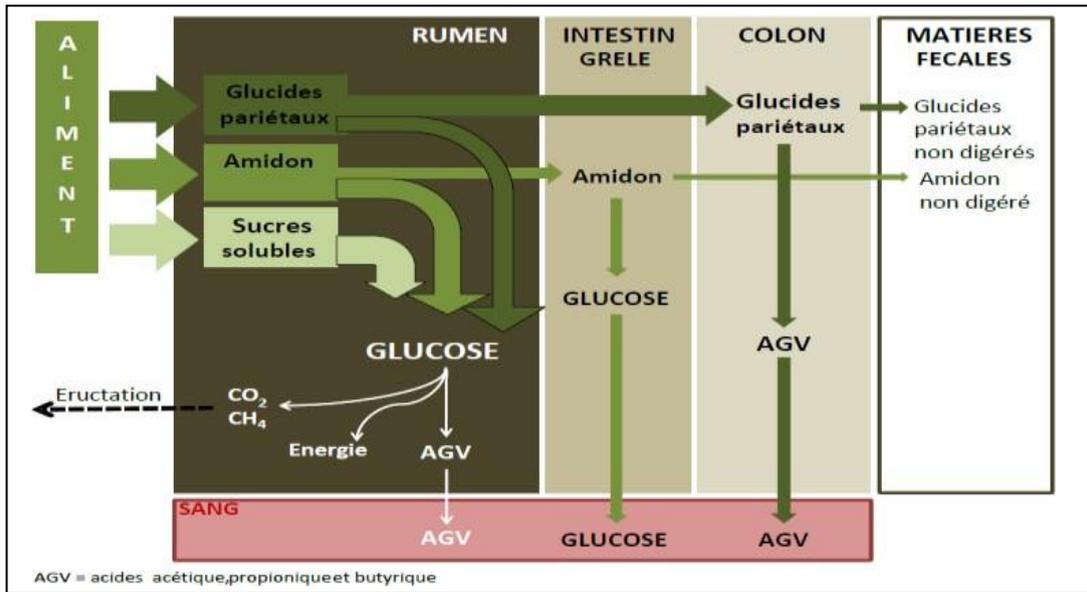


Figure 46 : Schéma de la digestion des glucides chez le ruminant

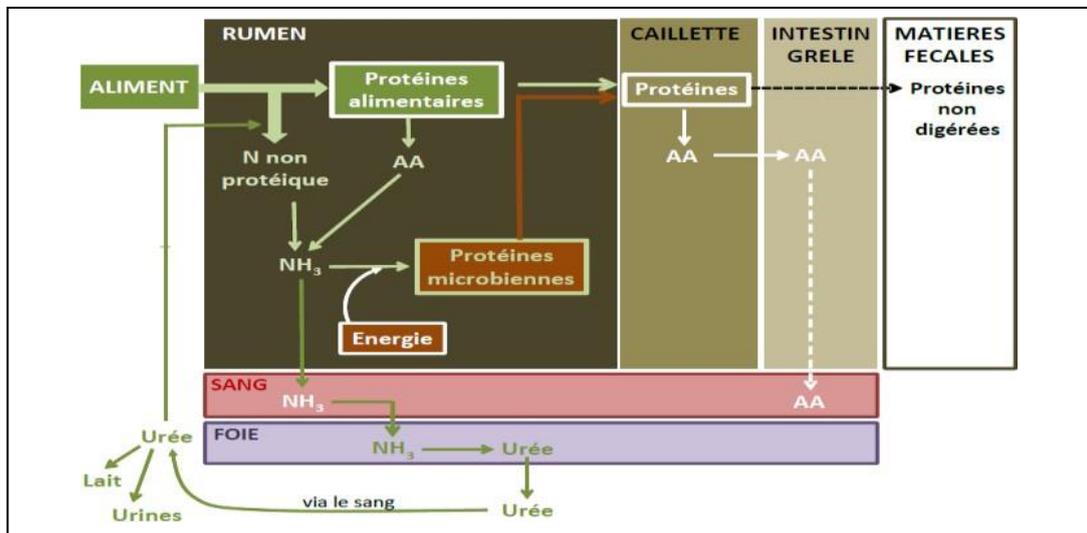


Figure 47 : Schéma de la digestion des matières azotées dans le rumen

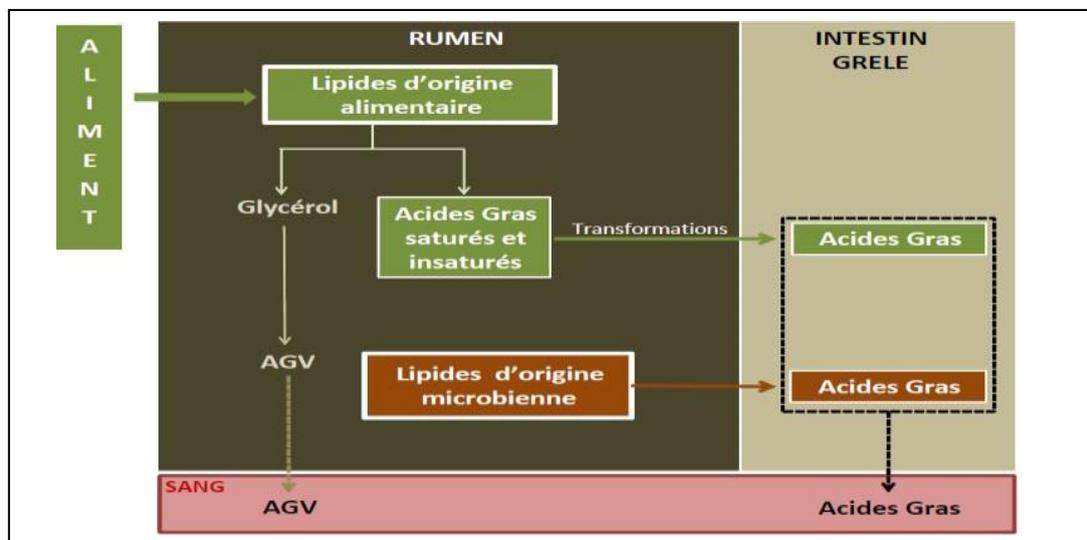


Figure 48 : Schéma de la digestion des lipides chez le ruminant (Cuvelier., C et al., Consulté le 10/01/2020)

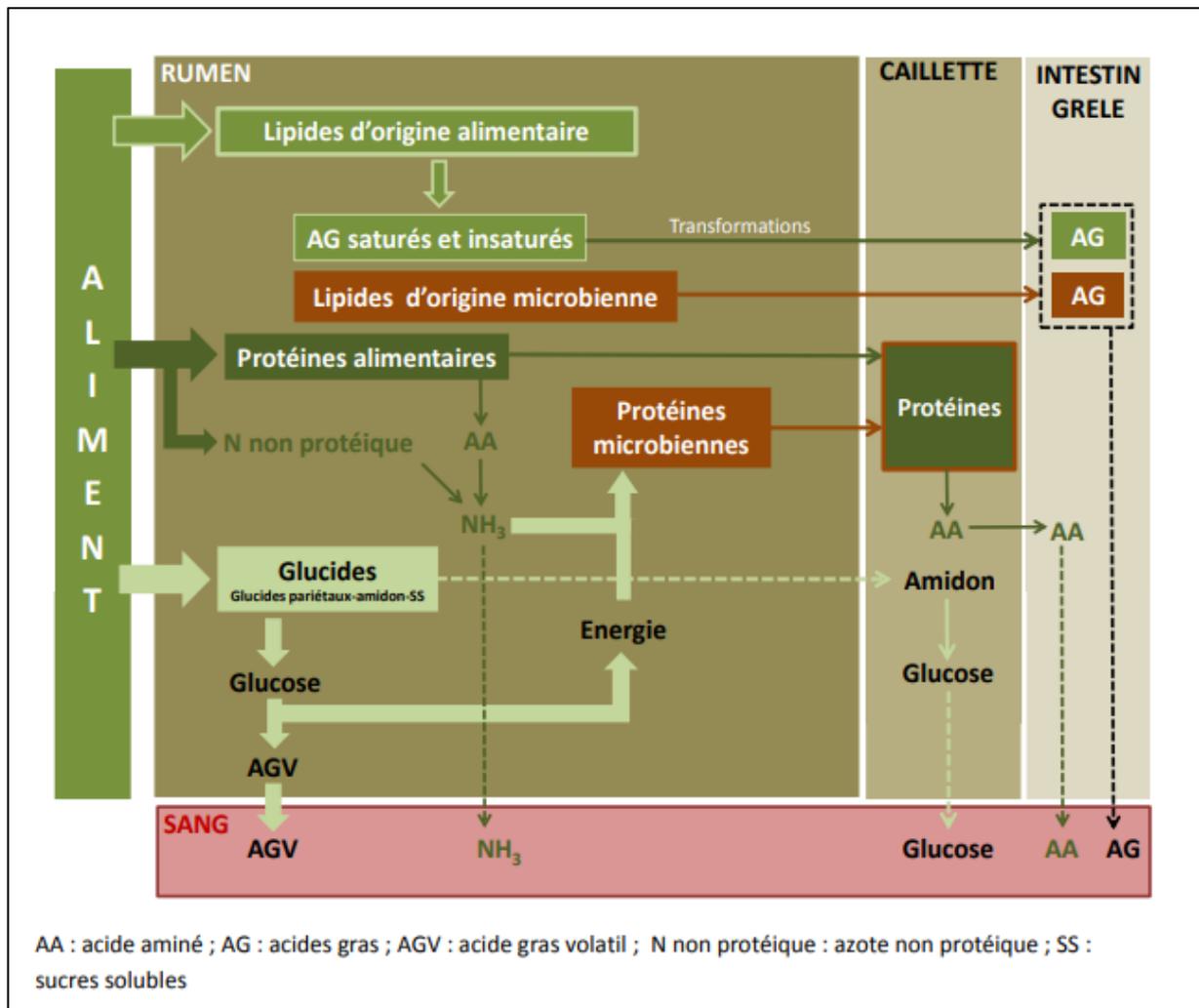


Figure 49 : Schéma simplifié de la digestion des glucides, des lipides et des matières azotées chez le ruminant (Cuvelier., C et Dufrasne., I. 2015)

Références bibliographiques

1. **Alane., F. (2007).** Valeur nutritive des légumineuses fourragères : Cas des luzernes (Genre *Medicago*). Thèse en vue de l'obtention du diplôme de magistère en sciences agronomiques. Institut national agronomique El-Harrach.96p
2. **Anonyme 1 :** https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9quoia_g%C3%A9ant(consulté le 14/11/2019)
3. **Anonyme 2 :**http://www.memobio.fr/html/bioc/bi_pc_re.html(consulté le 06/03/2020)
4. **Anonyme 3 :** Anatomie de l'appareil digestif. Utilisation digestive et métabolique des aliments. <http://www.cfppa.fr/infocampus/wp-content/uploads/2013/10/La-digestion-.pdf>. 53p (consulté le 23/10/2019).
5. **Anonyme 4 :** Digestion ruminale des aliments. <https://planetvie.ens.fr/thematiques/animaux/systeme-digestif/la-digestion-ruminale-des-aliments> (consulté le 20/11/2019)
6. **Anonyme 5 :** La digestion chez les Mammifères. LEGTA de Quetigny (21) Classe préparatoire ATS Bio (post-BTSA-BTS-DUT) Biologie : B.1 Chapitre 15 : La digestion chez les Mammifères. <https://www.svt-tanguy-jean.com/uploads/1/2/0/4/120408978/ats-b1-5-digestion.pdf>. 42 p (consulté le 28/01/2020)
7. **Anonyme 6 :** Les besoins nutritifs des ruminants d'élevage. https://www.ecofog.gf/giec/doc_num.php?explnum_id=1708 .4p (Consulté le 24/03/2020)
8. **Anonyme 7:** Microbiote du rumen. Santé du rumen Guide technique. <https://ruminantdigestivesystem.com/fr/sante-rumen/rumen-microbiote/>(Consulté le 16/04/2020)
9. **Anonyme 8 :** Mieux comprendre le rumen, un fermenteur multi tâches très efficace. <https://www.bicarz.com/fr/binaries/Etude-Jouany-178384.pdf>32 p (consulté le 24/01/2020)
10. **Arrigo Y., Scharenberg., A.(2008).**Digestibilité et dégradabilité de la matière azotée de plantes riches en tanins. *Renc. Rech. Ruminants*, 2008, 15. 281p
11. **Baumont., B.(1996).** Palatabilité et comportement alimentaire chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 1996, 9 (5), 349-358
12. **Beckers., Y. (2009).** Alimentation azotée des ruminants : comment réduire les rejets dans l'environnement ? <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/122958/1/Alimentation%20azot%C3%A9e%20ruminant%20%5bMode%20de%20compatibilit%C3%A9%5d.pdf> (Consulté le 24/03/2020)
13. **Beckers., Y. (2010).** Mesure de l'ingestion des fourrages chez le ruminant. Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT) Université de Liège (ULg, Belgique).<https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/121863/1/Mesure%20de%20l%27ingestion%20chez%20le%20ruminant.pdf> 45 p (Consulté le 18/04/2020)
14. **Besle, J. M., et Jouany, J. P. (1990).** La biomasse pariétale des fourrages et sa valorisation par les herbivores. *INRA Prod. Anim.* , 1990, 3(1), 39-50
15. **Boudechiche., L et al., (2015).**Digestibilité in vitro et cinétique de fermentation des feuilles de cinq arbustes fourragers du nord est Algérien. *Revue Méd. Vét.*, 2015, 166, 11-12, 350-359

Références bibliographiques

16. **Bousseboua., R ; Feltane., R.(2018)**. Apport bibliographique sur les sources alternatives d'énergie (Hydrates de carbone) et d'azote non protéique pour la flore Ruminale (chez la race bovine). Université des Frères Mentouri Constantine. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Spécialité :*Biologie Moléculaire des Microorganismes*. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master.74 p
17. **Boye., M. (2014)**. Etude in sacco de la dégradation ruminale des fibres et des matières azotées de fourrages fertilisés avec du fumier traité ou non par du bacteriolit. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse. 106 p
18. **Boccard, R et Boissau, J. M. (1958)**. Modèle d'une cage a digestibilité pour petits ruminants. Annales de zootechnie, INRA/EDP Sciences, 1958, 7 (1), pp.89-96
19. **Briki., K et Debab., S. (2009)**. Etude microbiologique de la microflore ruminale des ovins, Méthanogènes et additifs alimentaires. Mémoire en ligne. Université Mohamed Boudiaf, Msila, Algérie.26p
20. **Brocard., V ; Brunshwig., P ; Legarto., J ; Paccard., P ; Rouille., B ; Bastien., D. (2010)**. LECLERC M-C. Guide pratique de l'alimentation du troupeau bovin laitier. L'Institut de l'élevage : Paris, 2010, 268 p
21. **Castillo-González., AR ; Burrola-Barrazab., ME ; Domínguez-Viverosb., J ; Chávez-Martínezb., A. (2014)**. Rumen microorganisms and fermentation. Arch Med, 46, 349-361
22. **Chavez Montes., R. A. (2008)**. *Caractérisation de mutants et transformants d'alpha-L-arabinofuranosidase chez Arabidopsis thaliana* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).135 p
23. **Cobo., E. (2007)**. *Alimentation des petits ruminants: comparaison ovin-caprin. Année universitaire 2006-2007*. 2007. Thèse de doctorat. UM2. 31p
24. **Cuvelier C., Cabaraux j.-F., Dufrasne I., Istasse L., Hornick J.-L. (2005)**. Production, digestion et absorption des acides gras chez le ruminant. *Ann. Méd. Vét.*, 2005, **149**, 49-59
25. **Cuvelier., CH ; Hornick., JL ; Beckers., Y ; Froidmonte., Knapp., E ; Istasse., L ; Dufrasne., I. (2014)**. Livret de l'agriculture : l'alimentation de la vache laitière Physiologie et Besoins. Université de Liège Centre Wallon de Recherches Agronomiques. P10
26. **Cuvelier C., Cabaraux J.F., Dufrasne I., Istasse L., Hornick J.L. (2005)**. Production, digestion et absorption des acides gras chez le ruminant. *Ann. Méd. Vét.*, 149, 49-59
27. **Cuvelier., C et al.,** L'alimentation de la vache laitière physiologie et besoins. [http://www.fourragesmieux.be/Documents_telechargeables/Cuvelier C Hornick J L Becker s Y Froidmont E Knapp E Istasse L & Dufrasne I Livret alimentation des VL 2 Besoins et physio.pdf](http://www.fourragesmieux.be/Documents_telechargeables/Cuvelier_C_Hornick_J_L_Becker_s_Y_Froidmont_E_Knapp_E_Istasse_L_&_Dufrasne_I_Livret_alimentation_des_VL_2_Besoins_et_physio.pdf).67 p (Consulté le 10/01/2020)
28. **Cuvelier., C et al., (2005)**. Production, digestion et absorption des acides gras chez le ruminant. In : *Annales de Médecine Vétérinaire*. Annales Médecine Vétérinaire, 2005. p. 49-59
29. **Cuvelier., C et Dufrasne., I. (2015)**. L'alimentation de la vache laitière : Aliments, Calculs de ration, indicateurs d'évaluation des déséquilibres de la ration et pathologies d'origine nutritionnelle. Université de Liège. *Livret de l'Agriculture*.91 p

Références bibliographiques

30. **De Vries., Trevor J. (2016).** Comprendre comment les bovins laitiers mangent et ruminent pour optimiser leur santé et leur production." CRAAQ-Symposium sur les bovins laitiers. 2016.https://www.agrireseau.net/documents/Document_96510.pdf (consulté le 12/02/2020). 12p
31. **Doreau M., Fievez V., Troegler-Meynadier A., Glasser F. (2012).** Métabolisme ruminal et digestion des acides gras longs chez le ruminant : le point des connaissances récentes. *INRA Prod. Anim.*, 25 (4), 361-374
32. **Doreau., M. (2008 a).** Apports et limites des techniques alternatives à la chirurgie expérimentale du tractus digestif des herbivores. *Bull. Acad. Vét. France -2008 -Tome 161 - N°5*<http://www.academie-veterinaire-defrance.org/>. 425-433 p
33. **Doreau., M. (2008 b).** Apports et limites des techniques alternatives à la chirurgie expérimentale du tractus digestif des herbivores. INRA de Clermont-Ferrand - Theix https://academie-veterinaire-defrance.org/fileadmin/user_upload/pdf/doreauw.pdf 12p (consulté le 13/11/2019)
34. **Drogoul, Carole, Gadoud, Raymond, Joseph, Marie-Madeleine, et al.,(2004).** *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage*. Educagri Editions, 2004. Tome 1. 270 p
35. **Drogoul, Carole, Gadoud, Raymond, Joseph, Marie-Madeleine, et al.,(2004).** *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage*. Educagri Editions, 2004. Tome 2. 312 p
36. **Dulphy, J.-P. et Faverdin, Ph.(1987).** L'ingestion alimentaire chez les ruminants: modalités et phénomènes associés. *Reproduction Nutrition Développement*, 1987, vol. 27, no 1B, p. 129-155
37. **Dulphy., J.P. (1995).** Ingestion et digestion comparées des fourrages chez différentes espèces d'herbivores. *INRA Prod. Anim.*, 1995, 8(4), 293-307
38. **Dusart., C. (2014).** La digestion ruminale: mise en place d'un modèle d'étude in vitro à long terme en cultures Batch. 2014. Thèse de doctorat vétérinaire. ENVT, 2014.123p
39. **Ferran., A. (2012).** Digestion microbienne chez les ruminants. http://physiologie.envt.fr/wpcontent/uploads/2007/11/Digestion_microbienne_chez_les_ruminants.pdf. 76 p (consulté le 22/01/2020)
40. **Ferran., A. (2010).** Digestion microbienne chez les ruminants. Cours de physiologie digestive. École Nationale Vétérinaire de Toulouse. Toulouse, France.
41. **Gallouin., F et Focant., M. (1980).** Bases physiologiques du comportement alimentaire chez les ruminants. *Reproduction Nutrition Développement*, 20(5B), 1563-1614
42. **Gebeyehu., A et Mekasha., Y. (2013).** Defaunation: effects on feed intake, digestion, rumen metabolism and weight gain. *Wudpecker J. Agric. Res.* 2:134 - 141
43. **Hervé belbis, Guillaume. (2007).** Flore du rumen : origine, composition, évolution, conséquences physiopathologiques. Ecole nationale vétérinaire d'Alfort. Faculté de médecine de Créteil. Thèse de doctorat vétérinaire.150 p
44. **Jarrige, R. (1980).** *Alimentation des ruminants*. INRA. 615 p
45. **Jarrige, R ; Ruckebusch, Y ; Demarquilly, C ; Farce, MH ; Journet, M. (1995).** Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion. INRA Editions : Paris, 1995, 921 p

Références bibliographiques

46. **Jean-Blain., C. (2002).** Introduction à la nutrition des animaux domestiques. Edition Tec et Doc. Paris, 424p
47. **Jouany, J.P. (1994).** Les fermentations dans le rumen et leur optimisation. *INRA Prod. Anim.*, 1994, 7(3), 207-225
48. **Jouany., J.P. (2011).** Mieux comprendre le rumen, un fermenteur multitâche très efficace. <https://www.bicarz.com/fr/binaries/Etude-Jouany-178384.pdf> 33p.
49. **Le Bars., H. (1991).** Interrelations entre glycogénèse et lipogénèse chez les ruminants. *Bull. Acad. Vét. de France*, 1991, 64, 193-206
50. **Léda., V. (2018).** Notions approfondies en alimentation. Webinaire en alimentation ovine - 2018. Centre d'expertise en production ovine du Québec https://cepog.com/wpcontent/uploads/2019/06/webinaire_notions_appfondies_alimentation_2018.pdf . 38p
51. **Meschy., F.(2007).**Alimentation minérale et vitaminique des ruminants : Actualisation des connaissances. *INRA Prod. Anim.*, 2007, 20 (2), 119-128
52. **Meynadier., A ; Dusart.,C ; Toutou., F.** La digestion ruminale des aliments <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/animaux/systeme-digestif/la-digestion-ruminale-des-aliments> (consulté le 23/02/2020)
53. **Michel A. Wattiaux.** Métabolisme des Protéines chez la Vache. L'institut babcock pour la recherche et le développement international du secteur laitier essentiels laitiers Université du Wisconsin à Madison. https://federated.kb.wisc.edu/images/group226/52750/1-7/de_05.fr.pdf (Consulté le 26/11/2020)
54. **Mickael Rey. (2012).** Implantation du microbiote et mise en place des fonctions du rumen chez le veau de race laitière et effet de la supplémentation en levures vivantes. Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse.323p
55. **Moine., C. (2005).** Extraction, caractérisation structurale et valorisation d'une famille d'hémicelluloses du bois. Obtention de matériaux plastiques par modification des xylanes. Université de Limoges Faculté des Sciences et Techniques de Limoges. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Limoges.284 p
56. **Ortigue-Marty., I et al., (2013).** Des rations de ruminants aux nutriments transférés par le foie et fournis aux tissus périphériques. *Renc. Rech. Ruminants*, 2013, 20. 4 p. Québec, Canada.90p
57. **Raaf., N et Griene., L. (2015).** Glucides (structures et métabolisme). Université Benyoucef Benkhedda. <http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/bioch1an16-glucides.pdf>. 163 p
58. **Ribot., J.J. (1980).** La digestion des herbivores. *Terre Malgache. Tany Malagasy, volume 20, avril 1980 pp : 9-50*
59. **Robles., V.R.E. (2006).** Effet de la fréquence de distribution de l'aliment sur l'ingestion, le comportement d'ingestion et la fermentation ruminale chez les génisses en engraissement intensif. Thèse de doctorat. Université Paul-Sabatier de Toulouse. Toulouse, France. 75p
60. **Rouissi., A. (2016).** Évaluation du profil en acides aminés et mesure de la digestibilité de l'azote du tourteau de canola chez des vaches laitières. *Maîtrise en sciences animales*. 90p

Références bibliographiques

61. **Rupert Régis et Radigue Pierre-Emmanuel. (2014).** Le système digestif des ruminants et son efficacité. Notions de base sur l'alimentation et la digestion des ruminants. <https://charolaise.fr/wp-content/uploads/2015/08/3-Le-systeme-digestif-des-ruminants-et-son-efficacite-P.E.-Radigue-Efficacite-Alimentaire-en-race-charolaise.pdf> 47p
62. **Satge., B. (1993).** Le pH du rumen étude bibliographique. Thèse Med. Vet. Toulouse. 200p
63. **Sauvan., D et Nozière., P. (2013).** La quantification des principaux phénomènes digestifs chez les ruminants : les relations utilisées pour rénover les systèmes d'unités d'alimentation énergétique et protéique. *INRA Productions Animales*, 2013, numéro 4.327-346 p
64. **Sauvant., D et Bas., P. (2001).** La digestion des lipides chez le ruminant. *INRA Prod. Anim.*, 2001, 14 (5), 303-310
65. **Thivend., P ; Fonty., G ; Jouany., J.P ; Durand., M ; Gouet., Ph. (1985).** Le fermenteur rumen. *Reprod. Nutr. Dévelop.*, **25**, 729-753
66. **Tiret., L. (2001).** Physiologie de la digestion. Polycopié, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Unité Pédagogique de Physiologie et Thérapeutique. 69 p
67. **Stewart., CS et Bryant., MP. (1988).** The rumen bacteria. *In: Hobson PN, editors. The rumen microbial ecosystem.* Elsevier Science Publisher, New York, 21-75. 527 p
68. **Ushida, K., et Jouany, J. P. (1986).** Influence des protozoaires sur la dégradation des protéines mesurée in vitro et in sacco. *Reprod.Nutr. Dévelop.*, 1986, 86 (1B), 293-294
69. **Vignau-Loustau., L et Huyghe., C. (2008).** Stratégies fourragères Pâturage-Ensilage-a. Foin. *Editions France Agricole*, 78-100
70. **Wallace., RJ. (1986).** Ecology of Rumen Micro organisms : Protein Use. *In: Dobson A, DobsonMJ (eds). Aspect of digestive physiology of ruminants.* Ithaca, New York (USA) : Comstock Publishing Associates, 99-116. 311 p
71. **Williams., AG et Coleman., GS.** The Rumen Protozoa. *In: Hobson PN, Ed. The rumen microbial ecosystem,* Elsevier Science Publishing, New York, 77-111. 527 p
72. **Wertz., JL. (2010).** La lignine. Document ValBiom-Gembloux Agro-Bio Tech. p 5-8
73. **Wertz., JL. (2011).** Les hémicellulose. Document ValBiom - Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège.3 p
74. **Zened., A. (2011).** Particularités du microbiote et son activité lors de la déviation de la biohydrogénation ruminale de l'acide linoléique de la voie trans-11 à la voie trans-10. Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse.337 p