

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة الإخوة منتوري قسنطينة

UNIVERSITE DES FRÈRES  
MENTOURI CONSTANTINE

معهد العلوم البيطرية

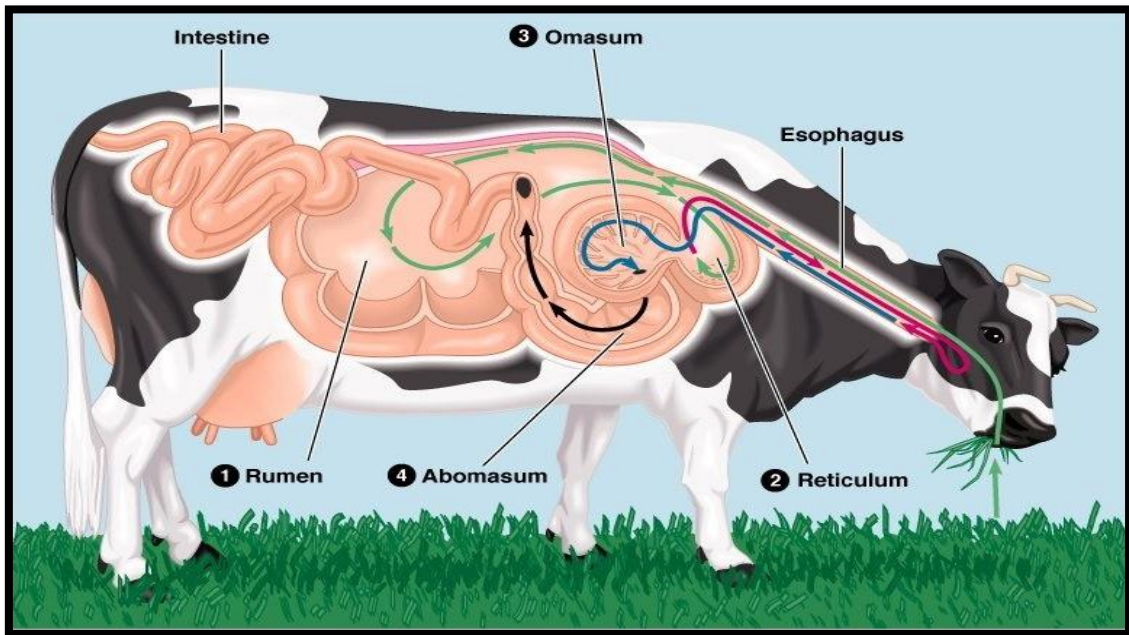
Institut des Sciences Vétérinaires



Département : Productions animales

Polycopié pédagogique

# NUTRITION DES RUMINANTS



D<sup>r</sup> DJAALAB Imen  
Maitre de conférences

Module d'alimentation  
Deuxième Année Docteur Vétérinaire

Année universitaire 2017-2018

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة الإخوة منتوري قسنطينة

UNIVERSITE DES FRERES  
MENTOURI CONSTANTINE

معهد العلوم البيطرية

Institut des Sciences Vétérinaires



Département : Productions animales

Polycopié pédagogique

# Nutrition des ruminants

D<sup>r</sup> DJAALAB Imen

## PREAMBULE

Ce polycopié rédigé cible comme public les étudiants en deuxième année docteur vétérinaire, conformément au programme du comité Pédagogique National, dont l'objectif général est d'apporter une vue d'ensemble de conceptions de base et des préoccupations relatives à l'alimentation et nutrition des ruminants.

Ceci implique que l'apprenant doit avoir des pré-requis en anatomie et en physiologie de l'appareil digestif des ruminants domestiques. Dans le but d'assimiler les connaissances en nutrition animale et l'utilisation métabolique des nutriments; ce pulic cible doit avoir des compétences en biochimie structurale et en biochimie dynamique.

L'objectif de ce cours est de:

- Apporter des connaissances en profondeur sur la composition physico-chimique des aliments consommés par les ruminants, afin d'utiliser de façon appropriée les aliments pour le bétail et d'assurer une nutrition optimale de ces animaux.
- Exposer les particularités anatomo-physiologiques du tube digestif et les interactions du biotope ruminal.
- Décrire les processus de base de l'utilisation digestive et métabolique dans la nutrition des ruminants.

A l'issue de l'apprentissage de ce cours, l'étudiant sera capable de:

- Caractériser les différentes catégories d'aliments et leurs composantes chez les polygastriques.
- Déterminer la valeur nutritionnelle des aliments pour les ruminants et d'utiliser des tables de composition alimentaire.
- Enumérer les étapes de la digestion dans les différents compartiments gastriques.
- Connaître les produits terminaux du métabolisme des nutriments et leur devenir dans l'organisme.

## LISTES DES ABREVIATIONS

**ADF** : Acid Détergent Fiber  
**ADL** : Acid Détergent Lignin  
**AGNE** : Acides Gras Non Estérifiés  
**AGV**: acide gras volatiles  
**ANP** : Azote Non Protéique  
**AOA** : Acide Oxalo-Acétique  
**ATP** : Adénosine Tri Phosphate  
**CB** : Cellulose Brute  
**CHE** : Cholestérol-Estérase  
**CHOD** : Cholestérol-Oxydase  
**CI** : Cendres Insolubles  
**CT** : Cendres Totaux  
**FAO**: Food and Agriculture Organisation  
**GOD** : Glucose-Oxydase  
**GK**: Glycérol-Kinase  
**GPO**: Glycérol-3-Oxydase  
**MAT** : Matières Azotées Totales  
**mg/dl** : milligramme /décilitre  
**mmol/l** : milli mol/litre  
**ml** : millilitre  
**mm** : millimètre  
**mmol** : millimôle  
**MO** : matière organique  
**MS** : Matière Sèche  
**MSa** : Matière Sèche analytique  
**NDF** : Neutral Détergent Fiber  
**LPL** : Lipoprotéine-Lipase  
**PDIA** : Protéines Digestibles au niveau de l'intestin.  
**POD** : Peroxydase  
**TG** : Triglycérides.

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	1
<b>I. ETUDE DES CONSTITUANTS DES ALIMENTS DES RUMINANTS</b>	2
<b>I.1. L'eau</b>	2
<b>I.2. La matière sèche</b>	3
<b>I.2.1. Les substances minérales ou matières minérales</b>	3
I.2.1.1. Les macroéléments ou minéraux majeurs	3
I.2.1.2. Les microéléments ou oligoéléments	3
<b>I.2.2. La matière organique</b>	4
<b>I.2.2.1. Les constituants glucidiques</b>	4
I.2.2.1.1. Les glucides pariétaux (fibres alimentaires)	4
I.2.2.1.1.1. La cellulose	4
I.2.2.1.1.2. Les hémicelluloses	5
I.2.2.1.1.3. Les substances pectiques	5
I.2.2.1.1.4. La lignine (constituants non glucidiques)	6
I.2.2.1.2. Les glucides cytoplasmiques ou intracellulaires	7
<b>I.2.2.2. Les constituants azotés ou matières azotées totales (MAT)</b>	8
I.2.2.2.1. Les matières azotées protéiques (MAP)	8
I.2.2.2.2. Les matières azotées non protéiques (MANP)	9
<b>I.2.2.3. Les constituants lipidiques</b>	10
<b>II. UTILISATION DIGESTIVE DES ALIMENTS</b>	12
<b>II.1. Particularités anatomiques du tube digestif des ruminants</b>	12
II.1.1. La préhension des aliments	12
II.1.1.1. La préhension des aliments solides	12
II.1.1.2. La préhension des liquides	12
II.1.2. Les pré-estomacs des ruminants	13
II.1.2.1. Le rumen (panse)	13
II.1.2.2. Réseau (réticulum ou bonnet)	13
II.1.2.3. Feuillet ( <i>Omasum</i> )	14
II.1.2.4. La caillette ( <i>Abomasum</i> )	14
II.1.2.5. Les intestins	15
II.1.2.5.1. L'intestin grêle	15
II.1.2.5.2. Le gros intestin	15
<b>II.2. La digestion chez les ruminants</b>	16
<b>II.2.1. Les phénomènes mécaniques</b>	16
II.2.1.1. Le broyage	16
II.2.1.1.1. La mastication ingestive	16
II.2.1.1.2. La mastication mérycique ou rumination	16
II.2.1.1. Facteurs influençant l'efficacité de la mastication	17
II.2.1.2. L'insalivation	18
II.2.1.3. Le brassage	18
II.2.1.3.1. Les cycles de motricité gastriques	19
II.2.1.3.1.1. Le cycle primaire	19
II.2.1.3.1.2. Le cycle secondaire	19

<b>II.2.2. Les phénomènes microbiens</b>	20
II.2.2.1. L'écosystème microbien	20
II.2.2.1.2. La microflore bactérienne	20
II.2.2.1.2.1. Classification selon leur fonction	20
II.2.2.1.2.2. Classification selon leur état de présence dans le rumen	21
II.2.2.1.2.3. Autres bactéries	21
II.2.2.1.2.4. Rôle des bactéries	22
II.2.2.1.2. Protozoaires	22
II.2.2.1.2.1. Protozoaires ciliés	22
II.2.2.1.2.2. Protozoaires flagellés	23
II.2.2.1.2.3. Rôle des protozoaires	24
II.2.2.1.3. Les champignons	24
II.2.2.1.3.1. Rôle des champignons	25
II.2.2.1.4. Mycoplasmes, virus et bactériophages	25
<b>II.2.3. Les phénomènes chimiques</b>	26
II.2.4. Conditions physico-chimiques dans le réticulo-rumen	26
II.2.4.1. Les différentes phases du contenu ruminal	27
II.2.4.1.1. La phase liquide	27
II.2.4.1.2. La phase solide	27
II.2.4.1.3. La phase gazeuse	27
II.2.4.2. Le pH	28
II.2.4.3. Le potentiel d'oxydo-réduction	29
II.2.4.4. La température	29
<b>II.3. Digestion et utilisation digestive des nutriments</b>	31
<b>II.3.1. Les glucides</b>	31
II.3.1.1. Digestion dans le rumen-réseau	31
II.3.1.1.1. Les glucides solubles	31
II.3.1.1.2. Les glucides pariétaux	31
II.3.1.1.3. Les produits de la fermentation	33
II.3.1.1.4. Les facteurs influençant la proportion des acides gras volatils	34
II.3.1.1.4.1. la nature de la ration	34
II.3.1.1.4.2. Le pH ruminal	34
II.3.1.1.4.3. La vitesse de dégradation du substrat	35
II.3.1.1.4.4. L'intensité des fermentations microbiennes	35
II.3.1.1.5. Absorption des acides gras volatils	35
II.3.1.2. Dans le feuillet	36
II.3.1.3. Dans la caillette	36
II.3.1.4. Dans les intestins	37
II.3.1.4.1. L'intestin grêle	37
II.3.1.4.2. Le gros intestin	37
<b>II.3.2. Les matières azotées</b>	39
II.3.2.1. Digestion dans le rumen-réseau	39
II.3.2.1.1. Dégradation de l'azote	39
II.3.2.1.1.1. Protéolyse	40
II.3.2.1.1.2. Hydrolyse des peptides	40
II.3.2.1.1.3. Dégradation des acides aminés	40
II.3.2.1.1.4. Devenir des autres composés azotés de la ration	41
II.3.2.1.1.5. L'uréogénèse à partir de l'ammoniac	41
II.3.2.2. Dans l'intestin grêle	43
II.3.2.3. Dans le gros intestin	43

<b>II.3.3. Les lipides</b>	44
II.3.3.1. Dans le rumen	44
II.3.3.2. Dans les intestins	45
<b>II.3.4. Absorption d'eau et de minéraux</b>	47
<b>III. UTILISATION METABOLIQUE DES NUTRIMENTS</b>	49
<b>III.1. Métabolisme du glucose</b>	49
III.1.1. La néoglucogenèse	49
<b>III.2. Métabolisme des lipides</b>	52
III.2.1. Lipides totaux	53
III.2.2. Triglycérides	53
III.2.3. Cholestérol	54
<b>III.3. Métabolisme des substances azotées</b>	56
III.3.1. Protéines totales	56
III.3.2. Albumine	57
III.3.4. Urée	57
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	59

## INTRODUCTION

L'étude du fonctionnement de l'appareil digestif des ruminants est essentielle pour la maîtrise de leur nutrition. Ce sont les seuls êtres vivants ayant leur principal fermenteur situé dans le segment digestif antérieur. En effet, il réunit des conditions physico-chimiques particulières permettant l'existence et le fonctionnement d'un microbiote spécifique. Cette symbiose offre aux ruminants la possibilité de tirer parti des constituants lignocellulosiques des parois végétales.

Ces études sont réalisées, dans la plupart du temps, afin d'optimiser les bilans économiques d'élevage et la qualité des produits d'origine animale pour le consommateur humain.

Ainsi, c'est un appareil remarquable pour valoriser des rations constituées par des fourrages riches en glucides pariétaux. Mais, il devient problématique quand ces fourrages en sont pauvres. Surtout, quand ils sont remplacés par une grande proportion d'aliments ayant de fortes teneurs en glucides non pariétaux comme l'amidon et les sucres ; constituants que les ruminants n'ont pas rencontrés en concentrations élevées dans la plus grande partie de leur évolution longue de plus de dix millions d'années.

Afin d'acquérir les connaissances de base relatives à la digestion, l'absorption et la métabolisation des nutriments, nous avons jugé important d'évoquer dans ce polycopié l'organisation structurale et la composition physico-chimique des aliments consommés par les ruminants.

Ce document destiné aux étudiants de deuxième année docteur vétérinaire, se veut le plus simple possible, donner toutes les informations relatives et nécessaires pour une formation en médecine vétérinaire de qualité.



## **I. ETUDE DES CONSTITUANTS DES ALIMENTS DES RUMINANTS**

L'aliment se définit comme un mélange de différentes substances ou produits ingérés par les animaux, apportant les matières et énergie nécessaires à sa survie et son développement. Un aliment unique est généralement incapable de faire face, seul, à l'ensemble des besoins nutritionnels pour l'entretien et les différentes productions. C'est la raison pour laquelle plusieurs aliments sont associés au sein d'une ration. Par contre, les nutriments sont des substances organiques ou minérales issues de l'alimentation, issues des processus de dégradation et de digestion. Ces molécules sont directement assimilables par l'organisme.

Les aliments seront caractérisés par les résultats de leurs analyses chimiques et par leur groupe d'appartenance typologique. Tous les aliments sont constitués des mêmes composants comme illustré dans le tableau 1. Ces éléments sont : l'eau, la matière minérale et la matière organique (glucides, lipides, protéides et composés azotés non protéidiques).

### **I.1. L'eau**

Tous les aliments contiennent de l'eau, même ceux qui apparaissent très secs comme les grains et les graines. L'eau représente un solvant idéal pour plusieurs constituants cellulaires et un grand nombre de molécules. Elle intervient dans de nombreuses réactions biochimiques. L'organisme ne peut pas faire des réserves d'eau et peut réagir très vite à un déficit d'apport ; ce qui confère à l'eau un rôle nutritionnel très important.

L'apport d'eau par les aliments est extrêmement variable en fonction de leur nature ; Chez les ruminants, les fourrages succulents comme l'herbe et les betteraves renferment entre 78 et 92% d'eau (8 à 22% de matière sèche (MS)), ce qui contribue à une couverture du besoin, par contre les foin et les graines ne contiennent que 15 à 20% d'eau (80 à 85% de MS).

Une vache laitière au pâturage consommant ainsi 70 kg d'herbe jeune ingère par cette voie 60 litres d'eau, alors que le même animal consommant 12 kg d'un foin d'excellente qualité n'absorbera que 1,5 litre d'eau. La quantité d'eau de boisson spontanément absorbée peut donc varier considérablement en fonction du degré d'hydratation de la ration et devenir même, dans certains cas, insignifiante.

## **I.2. La matière sèche**

La matière sèche est composée de la matière organique et de la matière minérale, obtenue par dessiccation de l'aliment. La matière sèche est le résidu sec. Par ailleurs, du fait de ces grandes variations, la comparaison de la valeur des aliments n'est possible qu'exprimée par kg de MS et non par kg de produit brut.

### **I.2.1. Les substances minérales ou matières minérales**

Quel que soit l'origine de l'aliment soit végétale ou animale, il contient des minéraux qui se trouvent sous forme de sels libres ou d'atomes au sein de combinaisons organiques (cas du phosphore dans les acides nucléiques, le soufre dans les acides aminés soufrés et le cobalt dans la vitamine B12). Les matières minérales totales (ou cendres brutes) représentent de 8 à 15 % de MS des fourrages. Selon leur abondance, on distingue:

#### **I.2.1.1. Les macroéléments ou minéraux majeurs**

Ce sont les minéraux nécessaires en grandes quantités, ce sont majoritairement les chlorures, les phosphates, les sulfates, les carbonates de calcium, le magnésium et le potassium. Les fourrages présentent des teneurs minérales variant de 0,2 à 7 g/kg de MS pour le phosphore ; 0,4 à 41 g/kg de MS pour le calcium et 0,3 à 10 g/kg de MS pour le magnésium.

#### **I.2.1.2. Les microéléments ou oligoéléments**

Retrouvés à des concentrations faibles dans l'organisme qui n'a besoin que de petites quantités. Ce sont : le fer, le cuivre, le cobalt, le manganèse, l'iode, le zinc, le sélénium. Les fourrages renferment  $5,2 \pm 0,8$  mg/kg de MS en Cuivre et  $29,1 \pm 0,4$  mg/kg de MS en Zinc. Il y a 13 autres éléments traces qui sont considérés comme essentiels (sous conditions pour certaines espèces animales), représentés par le chrome, le molybdène, le nickel, le fluor, l'arsenic, le lithium et le rubidium.

Les minéraux sont recommandés pour assurer les importantes fonctions organiques des animaux. Ils peuvent être :

- Des composants structuraux, des organes et tissus, comme l'os et les dents ;
- Des éléments constituant les fluides du corps.

Les minéraux peuvent être des électrolytes et joueraient un rôle physiologique important dans la pression osmotique, la balance acido-basique, la perméabilité de la membrane, la transmission nerveuse, la régulation des divisions cellulaires et dans leur différenciation. Les

minéraux peuvent également jouer le rôle de cofacteurs, coenzymes et métaloenzymes, qui participent dans beaucoup d'activités du corps.

## **I.2.2. La matière organique**

Caractérisée par la présence de carbone, associée à l'hydrogène, à l'oxygène, parfois à l'azote et à de petites quantités de phosphore et de soufre. Les composants de la matière organique sont des glucides, des lipides et des matières azotées.

La connaissance de la composition en constituants organiques d'un aliment et de leur devenir dans le tube digestif de l'animal est à la base de l'expression de sa valeur nutritive.

### **I.2.2.1. Les constituants glucidiques**

Les glucides représentent des composants majoritaires des aliments d'origines végétales, ils sont classés en deux catégories : les glucides pariétaux et les glucides cytoplasmiques.

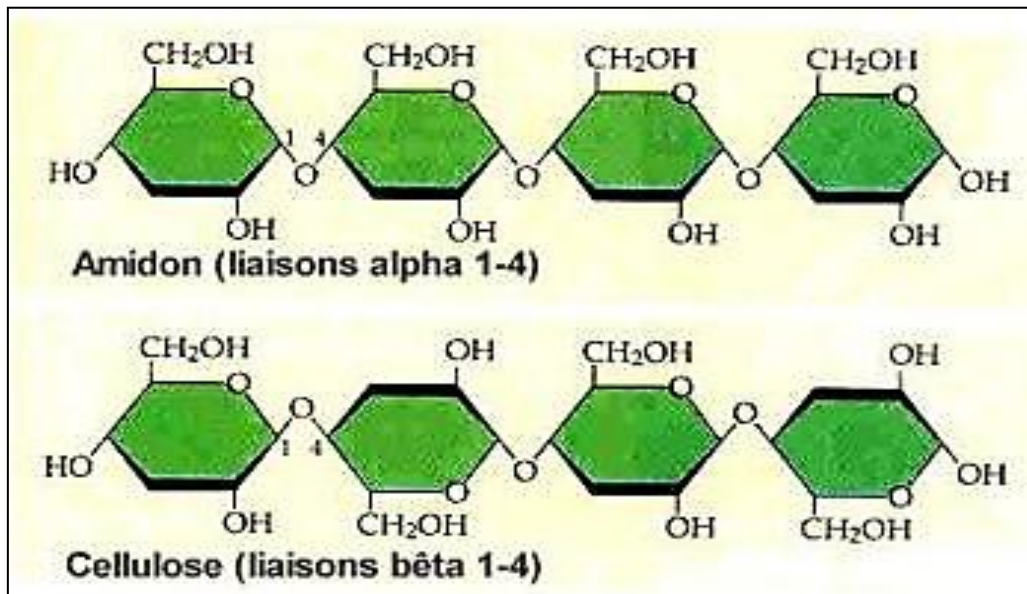
#### **I.2.2.1.1. Les glucides pariétaux (fibres alimentaires)**

Sont les constituants des parois des cellules végétales. On distingue les glucides proprement dits ou polyosides contenant 3 groupes de polyosides: la cellulose, les hémicelluloses et les substances pectiques. De plus, il y a les constituants non glucidiques qui leur sont associés (lignine).

##### **I.2.2.1.1.1. La cellulose**

Elle représente le constituant principal des parois, il s'agit de longues chaînes de glucose qui sont liées entre elles par des liaisons  $\beta$  (1-4). Les chaînes linéaires sont associées par des liaisons hydrogène qui ne peuvent être rompues que par des enzymes bactériennes (caractéristiques des ruminants). Le degré de polymérisation de la cellulose peut aller jusqu'à 1400 unités glucose. C'est le polysaccharide le plus abondant et le plus largement répandu dans la nature, constitue 20-50% de la matière sèche de la plupart des tissus végétaux.

La cellulose est le principal constituant des parois secondaires des cellules végétales. Elle est insoluble dans les acides faibles et les bases faibles ainsi que dans l'eau. Dans les fourrages, elle représente 40 à 45 % de l'ensemble des parois et de la MS totale de la plante, la teneur varie de 15 à 40 % selon l'espèce et surtout selon l'âge de la plante. Cette proportion augmente avec l'âge de la plante et c'est ce qui explique en partie la diminution de la digestibilité lorsque la plante vieillit.



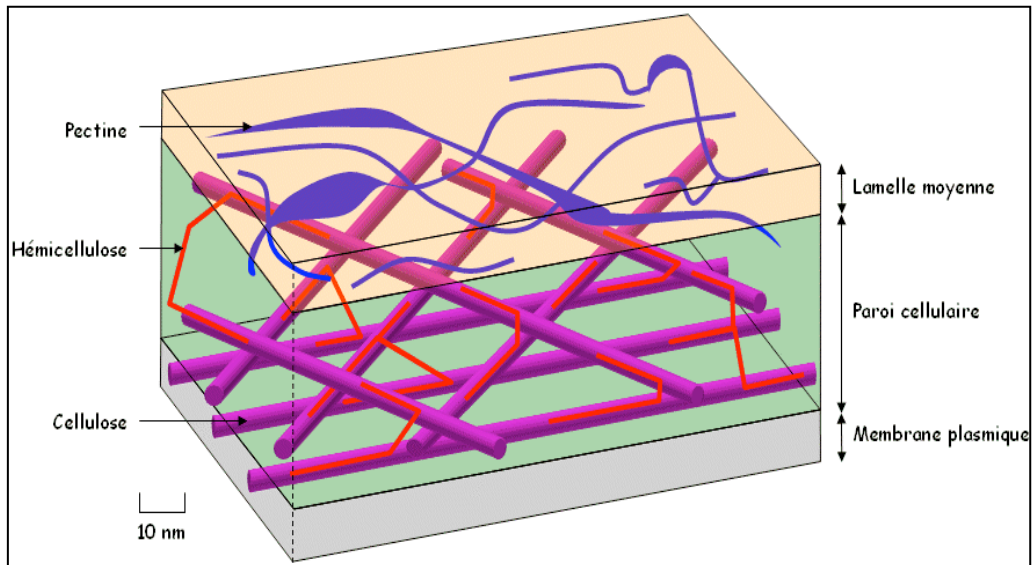
**Figure 1** : structure chimique de l'amidon et la cellulose

#### **I.2.2.1.1.2. Les hémicelluloses**

Ce sont des polysides qui accompagnent toujours la cellulose, mais sont moins résistantes à l'hydrolyse chimique ou enzymatique. Ils sont composés essentiellement de pentoses, de xylose en particulier, de quelques hexoses et d'acides uroniques. Ils constituent le principal composant des parois primaires des cellules végétales. L'hémicellulose se différencie de la cellulose par une présence simultanée de liaisons  $\beta(1-4)$  et  $\beta(1-3)$ . Leur teneur varie de 12 à 25% de la MS des fourrages. Plus la plante vieillit, plus la teneur en hémicelluloses augmente. Leur digestibilité est un peu inférieure à celle de la cellulose en raison de leur imprégnation par la lignine.

#### **I.2.2.1.1.3. Les substances pectiques**

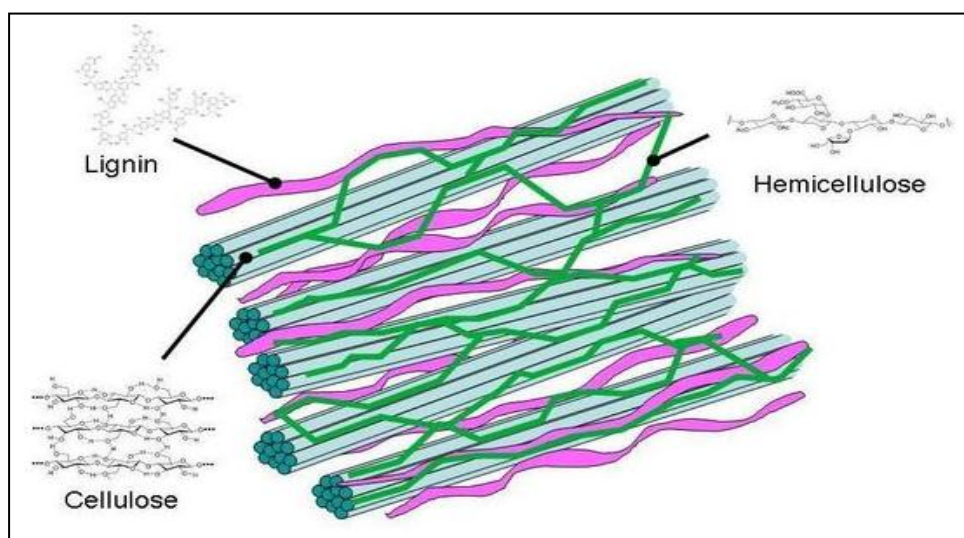
Ce sont des polymères qui donnent par hydrolyse des acides uroniques (acide galacturonique), ainsi que d'autres oses: pentoses (fructose, arabinose), et hexoses (galactose). Les pectines se rencontrent dans les lamelles moyennes des cellules végétales. Elles présentent une teneur avoisinant les 2 % de la MS des graminées et ayant une digestibilité très élevée et proche de celle des glucides cytoplasmiques.



**Figure 2 :** Organisation structurale des glucides pariétaux

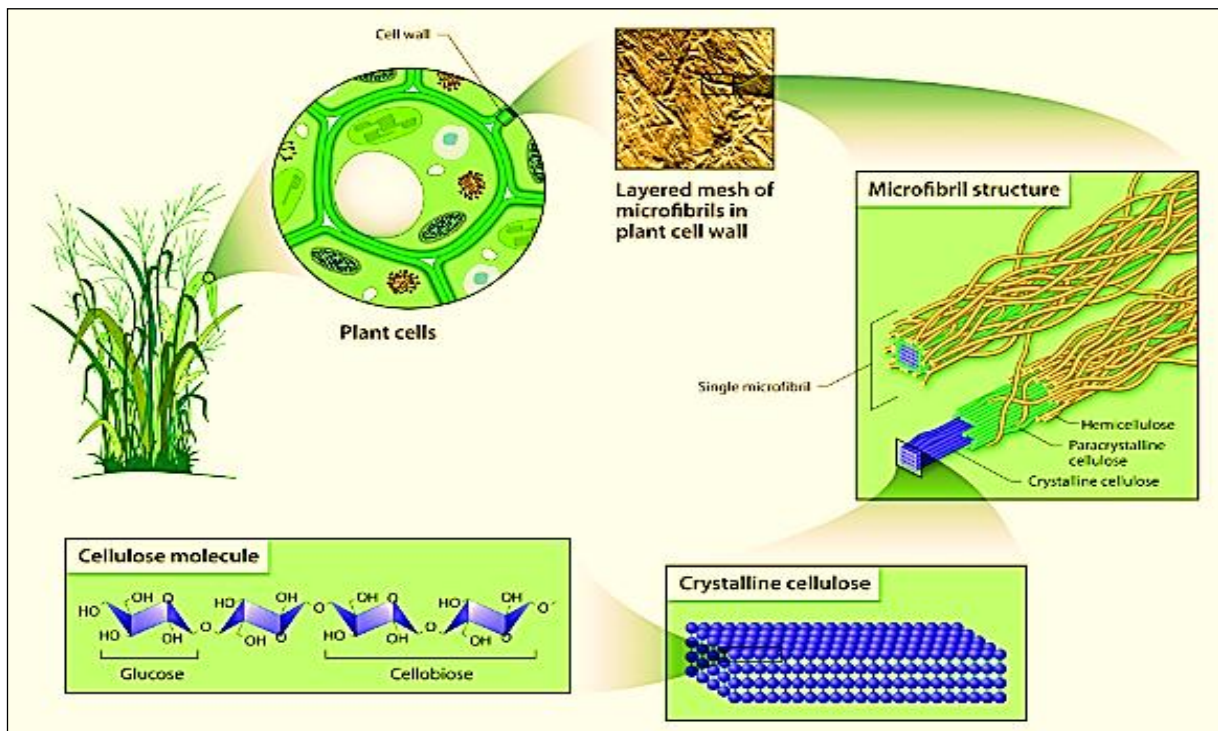
#### I.2.2.1.1.4. La lignine (constituants non glucidiques)

Substance de structure polyphénolique (formées d'alcools), la lignine incruste la cellulose et l'hémicellulose et rend les polysides pariétaux inaccessibles à l'action microbienne. L'organisation s'effectue autour des micro-fibrilles de cellulose et aboutit à un treillis dense et mécaniquement résistant. La lignine est totalement indigestible. Elle joue un grand rôle en limitant la digestibilité à la fois des glucides et des autres nutriments. De ce fait, la lignine représente un facteur de variation de la valeur nutritive des aliments d'origine végétale. Sa teneur varie de 2% dans l'herbe jeune à 12-13 % de la MS dans la paille.



**Figure 3 :** Dépôts de lignine entre les lamelles de cellulose et hémicellulose

En plus de leur faible digestibilité, les parois lignifiées résistent longtemps à la dégradation microbienne et à la mastication. Les particules résultant de cette dégradation vont séjourner plus longtemps dans le rumen que dans le cas des fourrages de bonne qualité, le temps de séjour de ces particules dans le rumen peut atteindre cinq jours dans le cas des fourrages pauvres. Donc le degré de dégradation des glucides dans le rumen dépend de leurs propriétés physiques et chimiques et en outre de la composition qualitative de la microflore.



**Figure 4 :** Organisation structurale de la paroi de la cellule végétale

#### I.2.2.1.2. Les glucides cytoplasmiques ou intracellulaires

Par opposition aux glucides pariétaux, les glucides cytoplasmiques (non structuraux) sont contenus dans les cellules végétales et sont plus facilement digestibles.

Les glucides intracellulaires sont constitués de sucres hydrosolubles, de grains d'amidon et de fructosanes.

Les sucres hydrosolubles représentent en général moins de 10% de la MS des aliments d'origine végétale, à l'exception de quelques graminées (*poacées*) jeunes, des betteraves et de la mélasse qui en sont plus riches. Ils sont mis en réserve dans les plastes des cellules végétales (amiloplastes). Les fructosanes s'accumulent à la base des tiges des graminées.



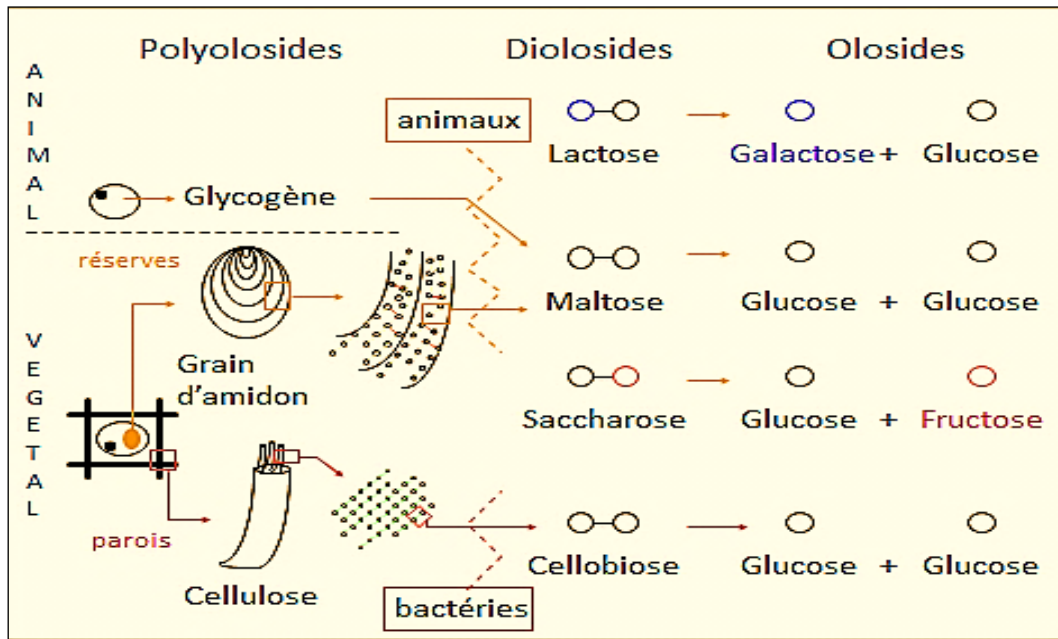


Figure 5: Les constituants des glucides intracellulaires et extracellulaires

### I.2.2.2. Les constituants azotés ou matières azotées totales (MAT)

#### I.2.2.2.1. Les matières azotées protéiques (MAP)

Ce sont les protéines, les polypeptides, les acides aminés libres. Les matières azotées protéiques donnent par hydrolyse des acides aminés. Leur structure et leur nature leur donne une certaine solubilité dans l'eau et dans les différents tampons ainsi qu'une aptitude à être hydrolysés par les enzymes bactériennes chez les ruminants.

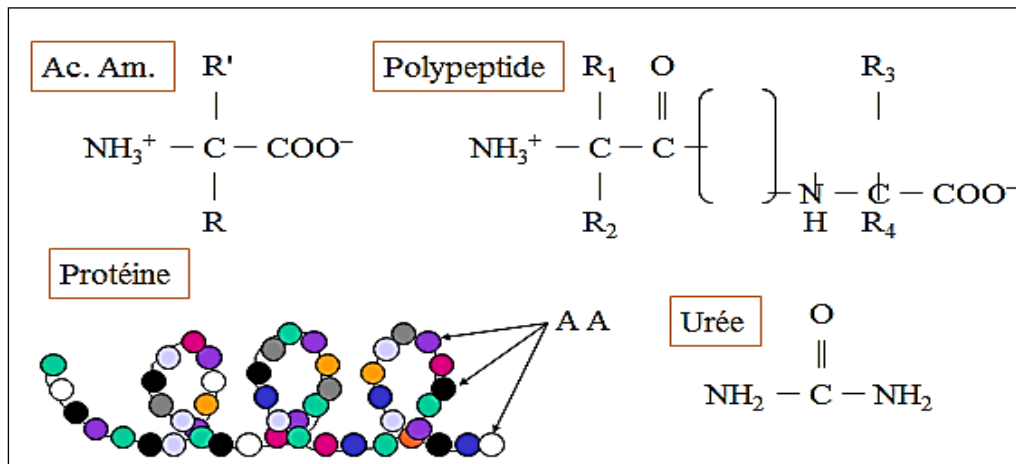


Figure 6 : diversité et complexité des protéines

### I.2.2.2.2. Les matières azotées non protéiques (MANP)

Ce sont les amides, les diverses nitrates et l'ammoniac. Les matières azotées non protidiques ne sont pas constitués d'acides aminés, il s'agit de formes azotées simples ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ). Parmi les aliments les plus riches, on trouve les graines oléagineuses et protéagineuses (22 à 40%), les céréales sont les plus pauvres (10%). La teneur en matière azotées chez les plantes fourragères varie de 15 à 35 % MS, elle dépend de leur stade de végétation ainsi que leur aspect botanique (teneurs supérieures des légumineuses par rapport aux graminées).

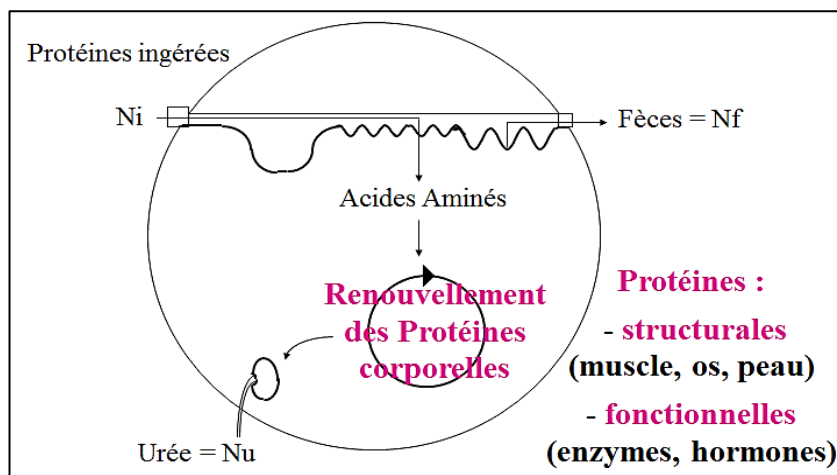


Figure 7 : importance des protéines : le flux azoté

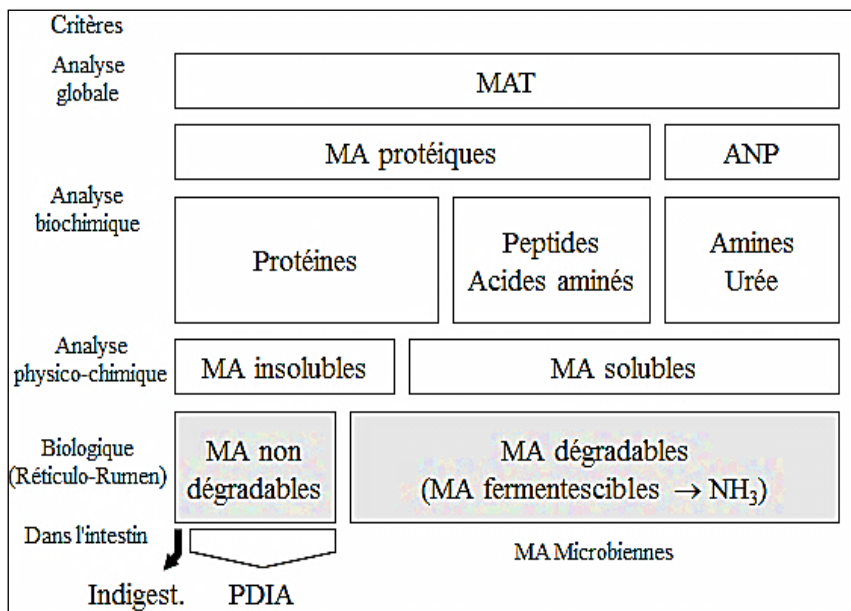


Figure 8: Classification des matières azotes totales



### I.2.2.3. Les constituants lipidiques

Ils s'agit de biomolécules organiques insolubles dans l'eau et les solvants organiques, chez les végétaux les lipides se localisent au niveau du chloroplaste des cellules. Dans les aliments, les lipides ou les matières grasses sont représentées par les triglycérides (esters d'acides gras) et le glycérol. On peut classer les acides gras qui composent cette matière grasse en : acides gras courts ou volatils (C1 à C4) acides gras moyens (C6 à C14) et acides gras longs (C16 à C22).

Dans les plantes fourragères, on trouve des galactolipides qui sont des glycérides associés à du galactose. Ils sont localisés dans les chloroplastes, riches en acides gras non saturés et en particulier l'acide linoléique. On rencontre également des cérides (qui sont des alcools à poids moléculaire élevé liés à des acides gras) dans la cuticule des feuilles où ils constituent la substance principale de la cutine qui est indigestible. Les lipides représentent une très faible fraction de la MS des fourrages (2 à 5%), ce qui explique le peu d'intérêt qu'il leur est accordé le plus souvent.

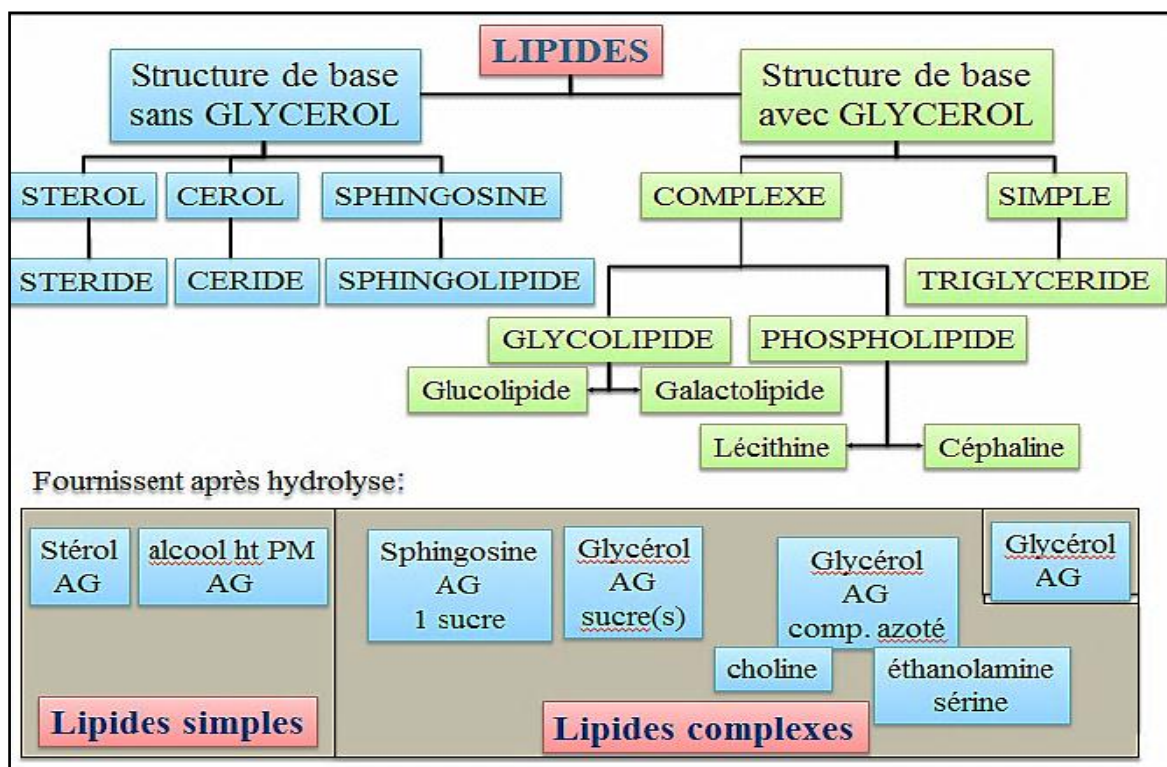


Figure 9: Classification des lipides

En récapitulatif, le tableau suivant nous renseigne sur les différents constituants des aliments d'origine végétale.

**Tableau 1 :** Différents constituants des aliments d'origine végétale

<b>M A T I È R E  B R U T E</b>	<b>Eau</b>	78 à 92% dans les betteraves fourragères 78 à 88% dans l'herbe verte 50 à 80% dans les ensilages et enrubannages 15 à 20% dans les foins et les grains			$H_2O$		
	<b>Matière sèche (obtenue par dessiccation)</b>	Matières minérales (cendres obtenues par combustion à 550°C)			<b>Macroéléments ou éléments majeurs</b>	Chlorures, phosphates, sulfates, carbonates de Ca, Na, Mg, K	
					<b>Microéléments ou oligo- éléments</b>	Fe, Cu, Zn, Co, Mn, I, Se...	
		Matière organique (brûle en dégageant du $CO_2$ )	Eléments ternaires ou substances hydrocarbonées (constitués de C, H, O)	<b>G L U C I D E S</b>	<b>Glucides cytoplasmiques (contenus cellulaires)</b>	Glucides solubles (sucres): ♦ en $C_5$ (ribose, desoxyribose) ♦ en $C_6$ (glucose, fructose) ♦ en $C_{12}$ (maltose, lactose, saccharose, mélibiose) Glucides insolubles de réserve (fructosanes, amidon)	
					<b>Glucides pariétaux (parois)</b>	Glucides insolubles de structure (cellulose, hémicelluloses, substances pectiques, lignine, cires ou cutine)	
					<b>Lipides ou corps gras</b>		Esters d'acides gras (glycérides, stérides, cérides)
					<b>Matières azotées protidiques</b>		Acides aminés libres et combinaisons d'acides aminés en peptides, polypeptides et protéines
			<b>Matières azotées non protidiques</b>		Amides (urée), Amines, Ammoniaque, bases azotées		
			Eléments quaternaires ou matières azotées (constitués de C, H, O, N)				

## **II. UTILISATION DIGESTIVE DES ALIMENTS**

### **II.1. Particularités anatomiques du tube digestif des ruminants**

Les ruminants sont des mammifères ongulés qui régurgitent et mastiquent plusieurs fois leur nourriture après l'avoir avalée. Parmi les herbivores, ils sont les plus performants pour tirer profit de l'énergie fixée par les végétaux grâce à une communauté microbienne extrêmement abondante et diversifiées qu'ils hébergent dans leur rumen.

Outre leur façon particulière de ruminer, ce qui caractérise les ruminants, c'est une organisation très particulière de l'estomac, avec en particulier un développement très important des pré-estomacs, qui n'existent pas chez les autres mammifères, et qui se situent avant la caillette. Cette dernière a la même structure et les mêmes fonctions que l'estomac des autres espèces.

#### **II.1.1. La préhension des aliments**

##### **II.1.1.1. La préhension des aliments solides**

Chez les bovins, la langue est longue et mobile, elle représente l'organe de la préhension des aliments, les touffes d'herbes et les tiges végétales sont entourées par la langue puis tirées dans la cavité buccale sectionnées par la pression des incisives sur le bourrelet incisif du maxillaire supérieur. La surface de la langue porte des papilles qui ne laissent pas les touffes d'herbe glisser. Ils arrachent l'herbe d'un coup de tête plus qu'ils ne la coupent, ils ne peuvent couper l'herbe plus ras que 2cm.

Les petits ruminants se servent de leurs lèvres très fines et mobiles, pour prendre les aliments, lorsqu'ils broutent l'herbe, ils se servent de leurs incisives inférieures et de leur langue mais à un degré moindre que les bovins. Les incisives des petits ruminants sont très fines et coupantes. Les moutons et les chèvres coupent l'herbe très ras, et de là ils tirent partie des pâturages pauvres.

##### **II.1.1.2. La préhension des liquides**

Chez les bovins comme chez les équidés pour boire ils n'introduisent que la partie médiane de l'ouverture labiale, ils aspirent le liquide grâce à une dépression réalisée dans la cavité buccale.

### II.1.2. Les pré-estomacs des ruminants

L'estomac des ruminants est composé de quatre poches : la panse, le bonnet, le feuillet et la caillette. Cet ensemble est très volumineux et occupe les 2/3 de la cavité abdominale.

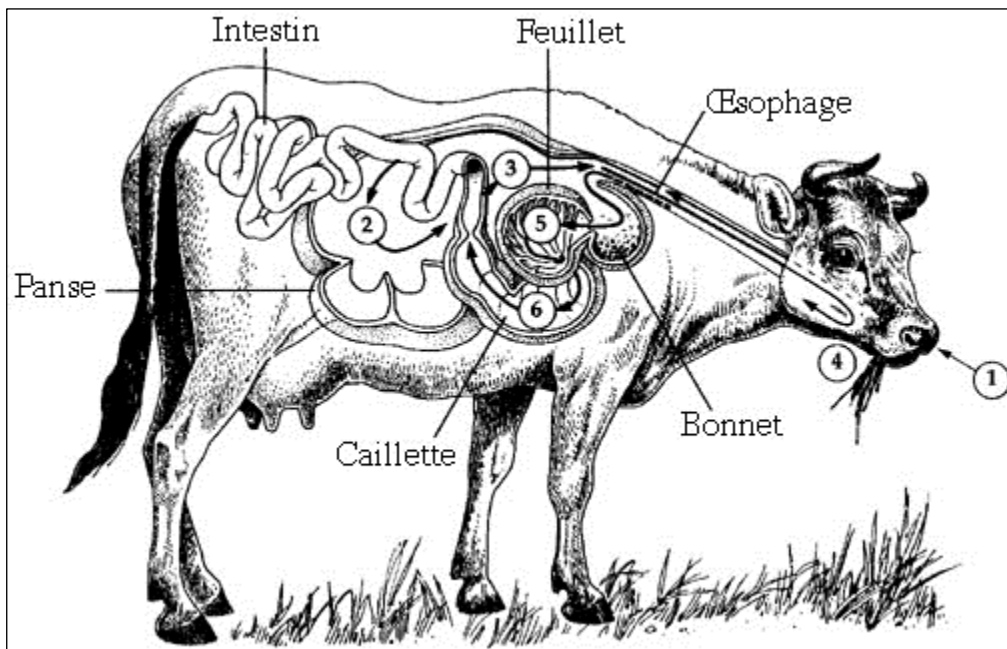


Figure 10: trajet du bol alimentaire dans le tube digestif d'un bovin

#### II.1.2.1. Le rumen (panse)

Ce réservoir très volumineux (90% du volume du pré-estomac) est logé dans la partie gauche de l'abdomen. Il est bilobé et possède deux orifices (figure 11): le cardia raccordé à l'œsophage et le col de la panse qui s'ouvre sur le réseau. Il offre un milieu idéal à la prolifération intense et variée des micro-organismes grâce aux conditions regroupées dans le bio-fermenteur naturel.

#### II.1.2.2. Réseau (réticulum ou bonnet)

Le plus antérieur et le plus petit, doit son nom à sa muqueuse réticulée et parsemée de papilles absorbantes (figure 11). Le réseau possède une ouverture assez large sur le rumen. Les particules alimentaires qui franchissent l'orifice réticulo-omasal doivent avoir une taille moyenne inférieure ou égale à 1mm ; ils sont donc séquestrés tant qu'ils n'ont pas atteints cette taille minimale. Le réticulum assure la circulation des particules grâce à ses contractions ayant une fréquence de l'ordre d'une contraction par minute. Il assure également

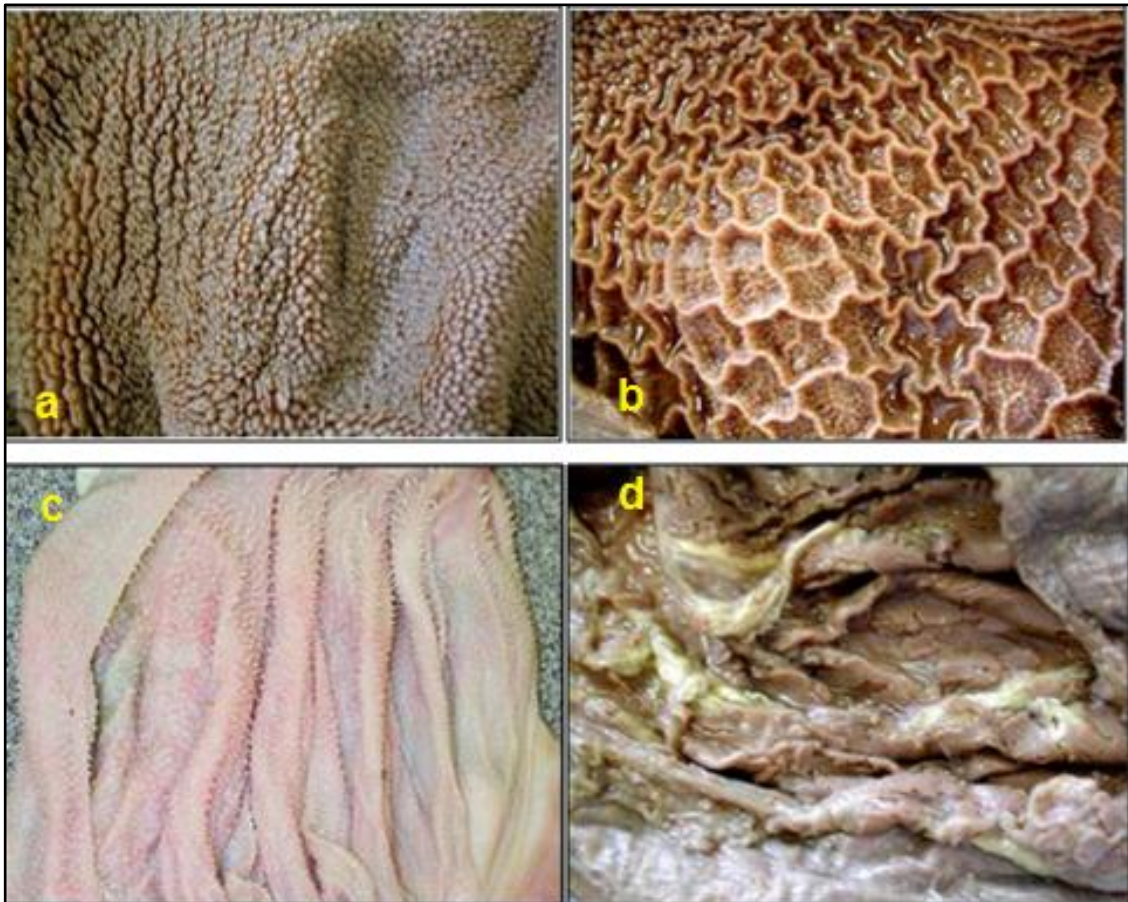
la motricité de l'ensemble des réservoirs gastriques et intervient dans la remontée du bol alimentaire lors de la rumination.

### II.1.2.3. Feuillet (*Omasum*)

Organe ovoïde, presque entièrement occupé par des lames parallèles, de hauteurs inégales, disposées dans le sens du transit alimentaire (figure 11). Le feuillet communique en aval avec la caillette par un orifice large et dilatable. Il intervient dans la filtration et l'absorption importante de l'eau.

### II.1.2.4. La caillette (*Abomasum*)

C'est le seul réservoir sécrétoire de l'estomac des ruminants .Sa cavité est tapissée par une muqueuse glandulaire, analogue à celle des monogastriques toujours recouverte d'une couche de mucus (figure 11). C'est à ce niveau qu'à lieu la sécrétion de l'HCl et du pepsinogène. La caillette est l'organe dans lequel s'effectue la digestion des protéines ayant échappé à la fermentation ruminale ainsi que la majorité des lipides.



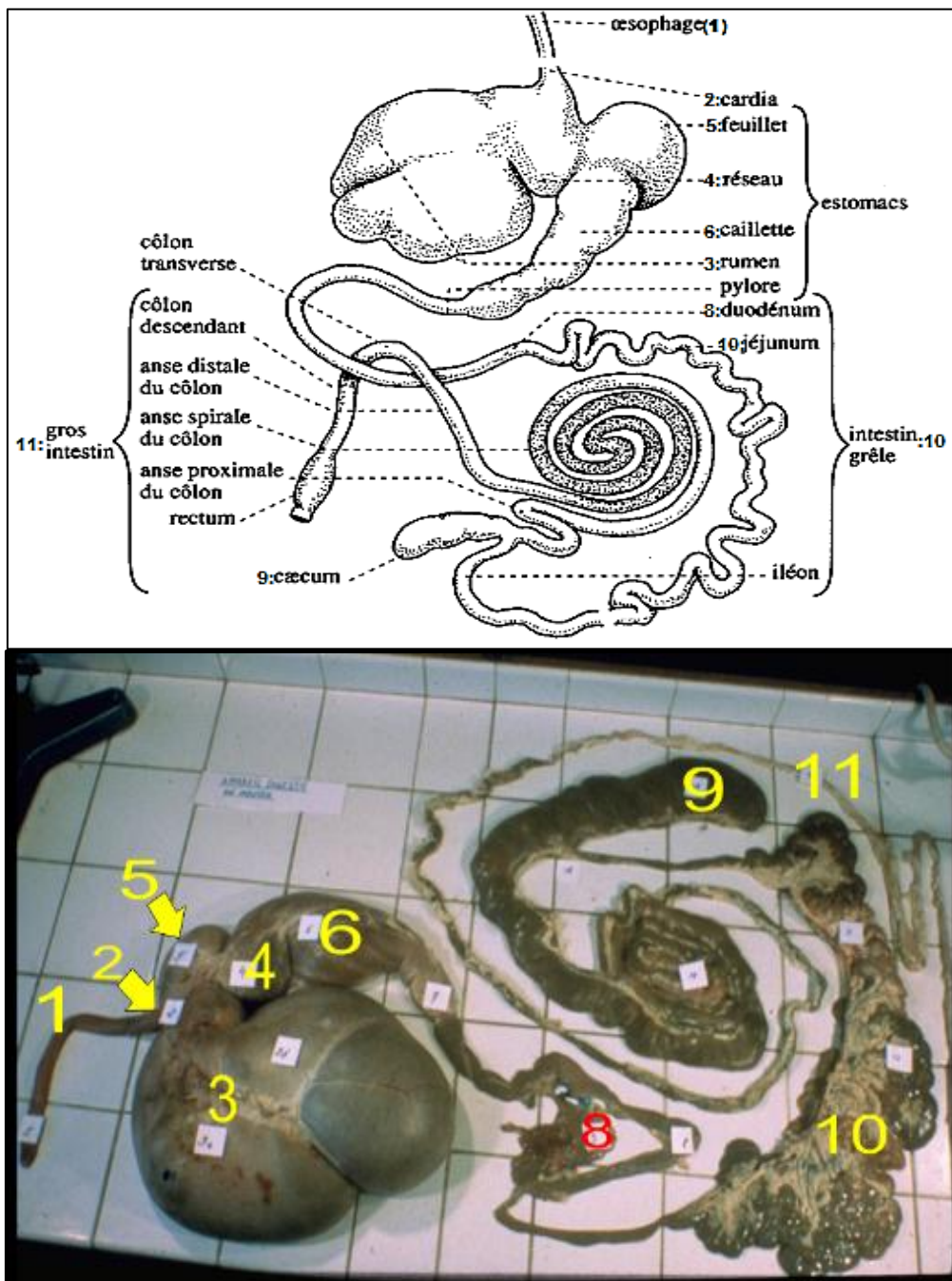
**Figure 11** : aspect de la paroi de l'estomac : a- rumen ; b- reseau ; c- feuillet ; d : caillette



**II.1.2.5. Les intestins** : sont divisés en deux parties :

**II.1.2.5. 1. L'intestin grêle** : qui se subdivise en trois segments successifs : le duodénum avec son anse duodénale qui reçoit les sécrétions biliaires et pancréatiques, le jéjunum et l'iléon. L'intestin grêle constitue la portion la plus longue et la plus étroite du tractus digestif. C'est le principal organe de la digestion enzymatique et de l'absorption.

**II.1.2.5. 2. Le gros intestin** : qui se divise anatomiquement en trois zones : le cæcum, le colon et le rectum. Le gros intestin ne secrète pas de sucs digestifs ; c'est le deuxième lieu de la fermentation microbienne après le réticulo-rumen.



**Figure 12** : tube digestif du bovin adulte

## **II.2. La digestion chez les ruminants**

La digestion est réalisée grâce à des enzymes cellulolytiques que les micro-organismes du rumen, du réseau et du gros intestin peuvent sécréter. La présence de la dégradation microbienne dans les pré-estomacs avant la dégradation chimique par les sécrétions gastriques dans la caillette modifie fortement la digestion et l'utilisation des aliments par les ruminants par rapport aux monogastriques.

A cet effet, la digestion met en jeu des phénomènes mécaniques, microbiens et chimiques.

**II.2.1. Les phénomènes mécaniques :** sont résumés en trois étapes majeurs ;

**II.2.1.1. Le broyage :** par l'intervention de deux types de mastication :

### **II.2.1.1.1. La mastication ingestive**

Cette mastication sert à la fragmentation des aliments mais de manière incomplète. Elle est réalisée grâce à des mouvements rapides des mâchoires (125 à 150 mouvements par minute chez les petits ruminants). Elle dure environ 8 heures par jour avec une mastication rapide au cours de laquelle les aliments s'entassent dans le rumen.

### **II.2.1.1.2. La mastication mérycique ou rumination**

C'est l'acte par lequel les aliments stockés dans le rumen et le réseau subissent une seconde mastication et une nouvelle insalivation. Elle est indispensable pour le bon déroulement des phénomènes biochimiques. La rumination est un état physiologique défini comme un phénomène cyclique qui se déroule en quatre étapes :

**a) La régurgitation du bol alimentaire comportant deux phases :**

*\*Une phase d'aspiration œsophagienne :* au cours de laquelle le réseau se contracte ce qui amène le contenu du rumen au niveau du cardia. Le cardia s'ouvre et l'animal inspire fortement créant une dépression intra-thoracique (vide relatif de l'œsophage). Cette dépression permet au contenu du rumen de remonter dans l'œsophage.

*\*Une phase d'expulsion vers la bouche :* due à une onde antipéristaltique accompagnée d'une expiration profonde.

**b) La déglutition de la partie liquide** servant de support.

**c) La mastication mérycique** au cours de laquelle les mouvements sont lents (40 à 60 mouvements par minute chez les bovins, 80 à 100 mouvements par minute chez les ovins) et la salivation est abondante.

#### d) La phase de repos.

Il existe 6 à 8 périodes de rumination par jour, en moyenne de 40 à 50 minutes chacune. La rumination est indispensable car elle fragmente les aliments et facilite l'attaque par les micro-organismes du rumen.

**II.2.1.1. Facteurs influençant l'efficacité de la mastication :** le temps de mastication ingestive et merycique dépend de:

#### a) La longueur d'aliment

Le ruminant passe environ 188- 219 mn/jour pour la mastication et 294 -364 mn/j pour la rumination lorsque les fragments de foin sont plus courts. Par contre, il passe environ 207- 245 mn/j pour la mastication et 380- 459 mn/j pour la rumination lorsque les fragments sont plus longs.

#### b) Le rapport fourrage/concentré dans le régime

Chez les petits ruminants, l'utilisation d'un régime contenant un rapport fourrage/concentré 75:25 au lieu de 45:55; entraîne une prolongation du temps de mastication (de 188 à 207 mn/j) et de rumination (de 299 à 363mn/j).

Par rapport au mouton, la chèvre a une fréquence de mastication ingestive plus élevée (154 coups contre 128 coups de mâchoire par minute pour un foin de luzerne ingéré à volonté), mais un temps d'ingestion plus lent. Cette ingestion a l'avantage de réduire en plus la taille des particules alimentaires (moins de 0.1mm) et par conséquent de diminuer le temps de rumination chez la chèvre.

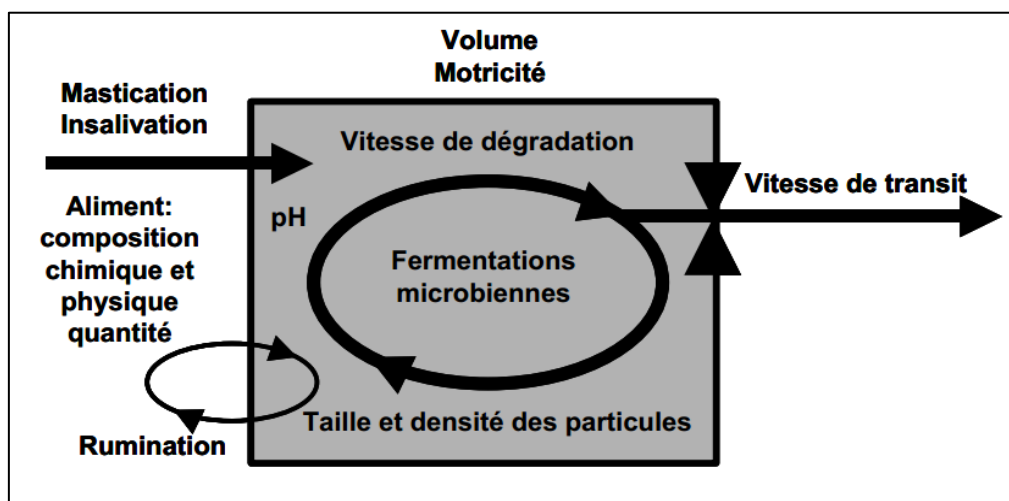


Figure 13 : facteurs influençant la digestion des ruminants



### II.2.1.2. L'insalivation

L'insalivation par la sécrétion de la salive. Le rumen reçoit chaque jour une cinquantaine de litres d'eau bue, et près de 200 litres de salive produite par les glandes salivaires. Même si une partie importante de ces liquides passe rapidement dans l'intestin, le contenu ruminal, très humide, contient plus de 80% d'eau, soit une centaine de litres d'eau. Outre son rôle lubrifiant des aliments, la salive permet un renouvellement suffisant (supérieure de 8% par heure) de la phase liquide du rumen et un recyclage de l'urée sanguine. Elle sert aussi à tamponner le pH ruminal.

### II.2.1.3. Le brassage

La motricité du complexe gastrique ou brassage régulier abouti au ramollissement et l'homogénéisation de contenu du rumen. Dans les conditions normales, la paroi du rumen, riche en fibres musculaires, est animée par de contractions régulières qui assurent un brassage efficace selon un cycle de 3 à 5 minutes.

Ces contractions sont le résultat de l'irritation de la paroi du rumen par les fibres végétales contenues dans la ration. De plus, la nature de ces fibres à une influence sur la fréquence et l'intensité des contractions. Pour être efficaces, les fibres doivent mesurer plusieurs millimètres de long et avoir des extrémités acérées.

Le réticulo-rumen est un fermenteur anaérobie où la digestion microbienne se déroule en continu. 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. Ensuite, ils permettent la vidange vers l'omasum. Puis ils contribuent à l'élimination des gaz de fermentation : c'est l'éructation.

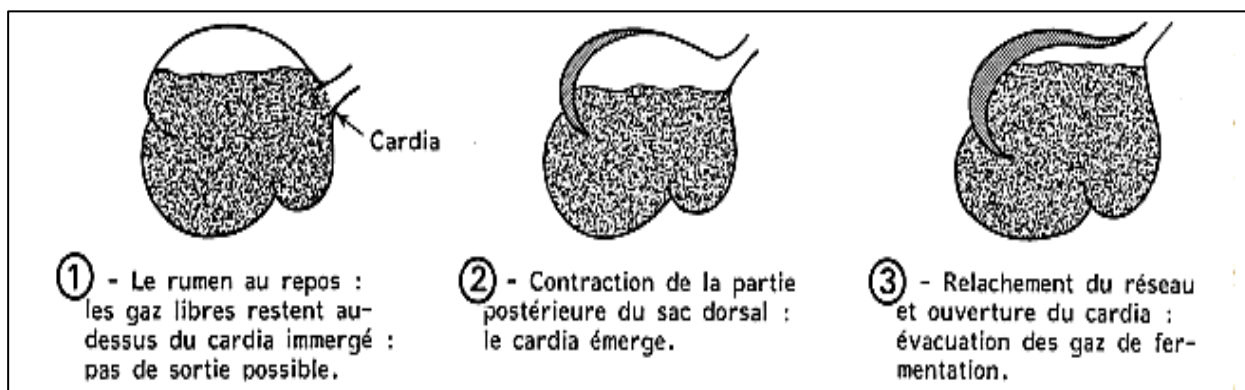


Figure 14 : mécanisme d'éructation

Cette motricité du complexe gastrique est contrôlée par le système nerveux central et notamment via le nerf vague. En effet, une suppression des efférences vagales va engendrer des contractions moins amples et plus fréquentes, dites intrinsèques. Ces dernières sont liées au fonctionnement du système nerveux myentérique. Chez l'espèce bovine la paroi du réticulo-rumen se contracte pendant 15 à 20 secondes, toutes les minutes environ.

### II.2.1.3.1. Les cycles de motricité gastriques

Dans le réticulo-rumen, il existe deux types de cycles de contractions, primaire et secondaire :

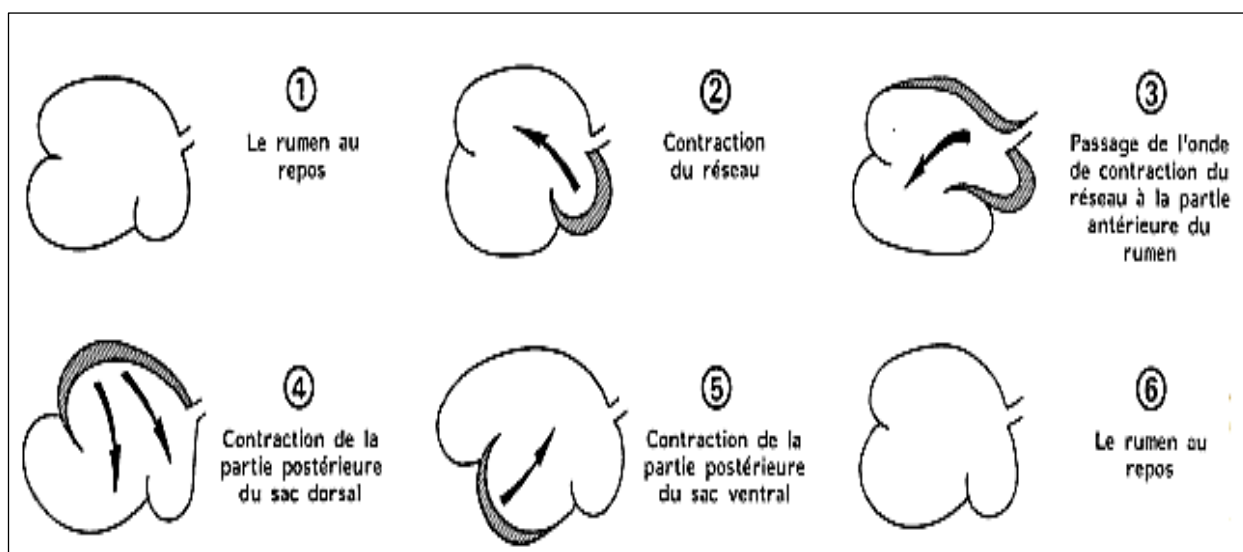
#### II.2.1.3.1.1. Le cycle primaire

Correspond tout d'abord à une contraction biphasique du réseau puis du sac dorsal dans le sens cranio-caudal et ensuite du cul de sac ventral dans le sens craniocaudal. Ce cycle primaire permet le brassage et la vidange du rumen.

#### II.2.1.3.1.2. Le cycle secondaire

Suit le cycle primaire toutes les 1 à 3 fois (suivant l'importance des fermentations). Ce cycle commence par une contraction du sac ventral postérieur puis une contraction simultanée du sac dorsal antérieur et du sac ventral antérieur. Ce cycle permet l'éructation. Cependant, la rumination est permise par une contraction isolée du réseau avant la contraction biphasique du cycle primaire. La rumination s'effectue par périodes, dont la durée peut être très variable (quelques minutes à quelques heures).

Ainsi, le réticulo-rumen est un vaste fermenteur animé de mouvements qui vont faciliter les fermentations microbiennes.



**Figure 15** : Motricité du complexe gastrique: cycle de contractions primaire et secondaire

## **II.2.2. Les phénomènes microbiens**

Les phénomènes microbiens se déroulent principalement dans le réticulo-rumen et ultérieurement, mais à faible intensité, au niveau du gros intestin grâce à la présence d'une population microbienne hétérogène.

### **II.2.2.1. L'écosystème microbien**

Cet écosystème est constitué essentiellement de populations: la microflore, la microfaune (protozoaires) et les champignons.

#### **II.2.2.1.2. La microflore bactérienne**

La population bactérienne du rumen est comprise entre  $8 \times 10^9$  et  $4 \times 10^{10}$ /ml de contenu ruminal, elle constitue 50% de la biomasse microbienne et c'est la catégorie la plus complexe et la plus importante. Différentes espèces bactérienne sont présentes dans le rumen. Plus de 300 espèces bactériennes sont connues et sont généralement des anaérobies strictes non sporulées. Elles représentent la flore la plus performante pour digérer la cellulose des fourrages compte tenu de leur nombre dans le rumen.

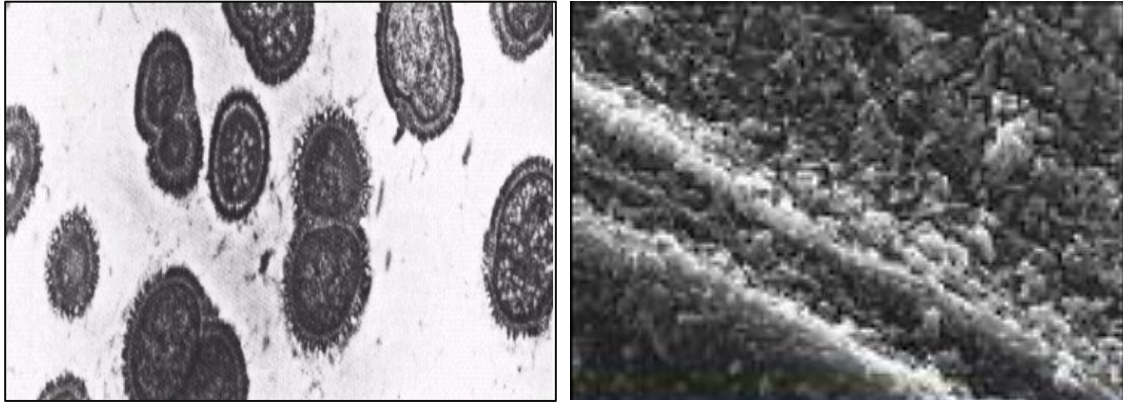
##### **II.2.2.1.2.1. Classification selon leur fonction**

- **Les bactéries cellulolytique**

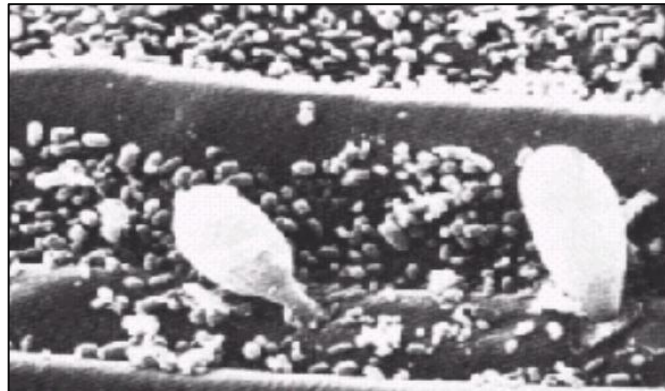
C'est le groupe des bactéries le plus important. Les principales bactéries cellulolytique isolées du rumen sont: *Ruminococcus albus*, *Ruminococcus flavefaciens*, *Bactéroides succinogènes*, *Fibrobacter succinogènes*. Ces souches ruminales sont capables d'hydrolyser complètement la cellulose cristalline telle que le coton.

- **Les bactéries amylolytiques**

Les espèces représentatives de ce groupe sont : *Selenomonas ruminantium* et *Streptococcus bovis*. La plupart des bactéries hydrolysant l'amidon son incapable d'utiliser la cellulose *Streptococcus bovis* produit de l'acétate et de l'éthanol, quand sa croissance est normale. *Bactériodes annylophilus* ne fermente que l'amidon, les dextrines et le maltose.



**Figure 16** : *Ruminococcus flavefaciens* (à gauche) et *Selenomonas ruminantium* (à droite)



**Figure 17** : Colonie de bactéries sur des fibres cellulosiques

#### **II.2.2.1.2.2. Classification selon leur état de présence dans le rumen**

- **Bactéries libres**

Le 1/3 des bactéries se trouve à l'état libre dans le liquide ruminal, elles utilisent les substances libérées dans le milieu ruminal en se développant vers les régions de forte concentration en substrats préférentiels.

- **Bactéries adhérentes**

Elles adhèrent soit aux particules alimentaires (70%), soit à la paroi ruminale.

#### **II.2.2.1.2.3. Autres bactéries**

- **Bactéries méthanogènes**

Ce sont essentiellement *Methanobacterium ruminantium* et *M. mobile*. Elles produisent du méthane ce qui permet d'éliminer les ions  $H^+$  en excès. D'où le rôle d'exutoire aux éléments réducteurs  $H^+$  en milieu anaérobie. En orientant la fermentation vers la production d'acétate,

elles potentialisent l'activité des bactéries cellulosiques et la croissance fongique mais cette production de CH<sub>4</sub> constitue une perte d'énergie pour les ruminants.

- **Bactéries pectinolytiques**

Leurs principales espèces sont : *Lachnospira multipara*, *Pervotellaruminicola*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Streptococcus bovis* et quelques souche de *Spirochètes*. Seulement quelque unes d'entre elles ont été isolées à partir de milieu sélectif contenant de la pectine purifiée comme seul substrat énergétique.

- **Bactéries protéolytiques**

Plusieurs espèces telles que *Mesgaphaera elsedinil*, peuvent croître à partir des acides aminés en absence de glucides comme source d'énergie.

#### **II.2.2.1.2.4. Rôle des bactéries**

Les bactéries se fixent par leur glycocalyx aux fragments végétaux. L'attaque se fait par érosion des surfaces endommagées et la surface bactérienne s'enfonce alors dans la paroi végétale. En effet, sur les parois intactes, les différents polymères glucidiques ne peuvent pas se lier à la surface bactérienne en raison de leur faible concentration, de leur liaison avec d'autres composants ou de leur configuration stérique incompatible avec les polymères extrêmes de la surface bactérienne.

#### **II.2.2.1.2. Protozoaires**

Ce sont des eucaryotes unicellulaires, mobiles grâce à leurs cils et leurs flagelles, pour ces dernières on va distinguer :

##### **II.2.2.1.2.1. Protozoaires ciliés**

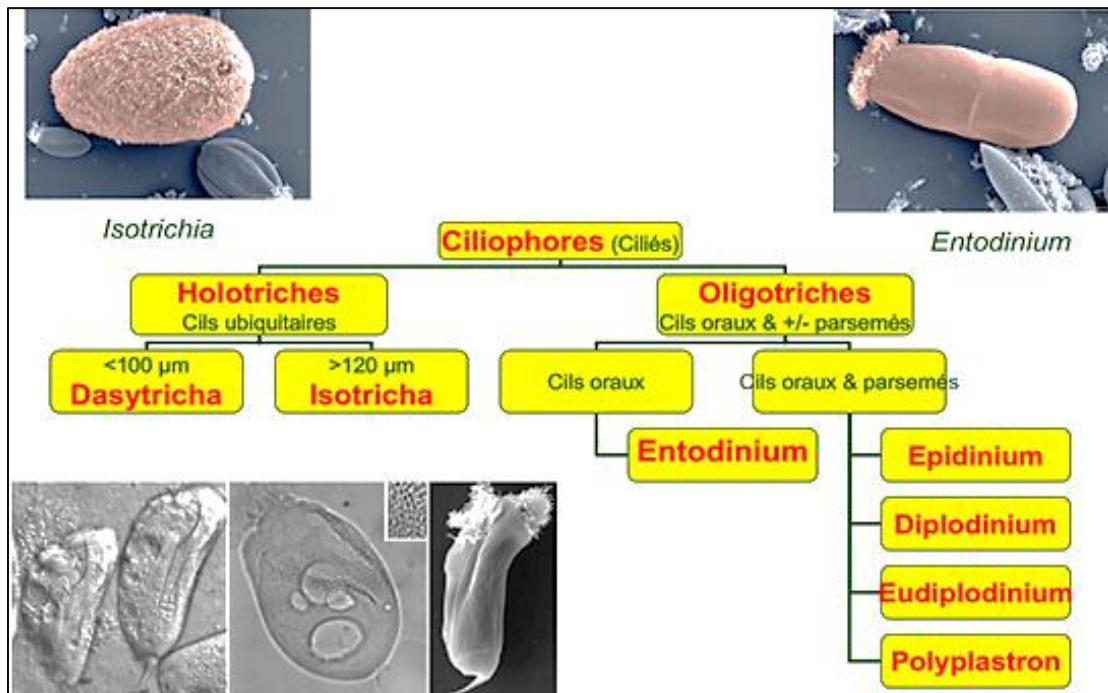
Ce sont les protozoaires les plus importants par leur nombre et leur influence sur la digestion. Leur concentration est de 10<sup>5</sup> à 10<sup>8</sup> cellules par ml et de taille de 50 à 300µm. Ils sont présents à l'état libre ou sont fixés aux particules végétales et peuvent ingérer les bactéries.



**Figure 18 :** Protozoaires ciliés

Les protozoaires ciliés comprennent deux groupes:

- **Les holotriches** : ils fermentent les sucres solubles, les fructosanes ainsi que les grains d'amidon de petite taille et ils stockent l'excédent sous forme d'amylopectine.
- **Les entodiniomorphes** : ils participent également dans la dégradation de la cellulose, l'hémicellulose, et les substances pectiques. Les ciliées ont aussi une activité protéolytique.



**Figure 19:** classification des protozoaires

#### II.2.2.1.2.2. Protozoaires flagellés

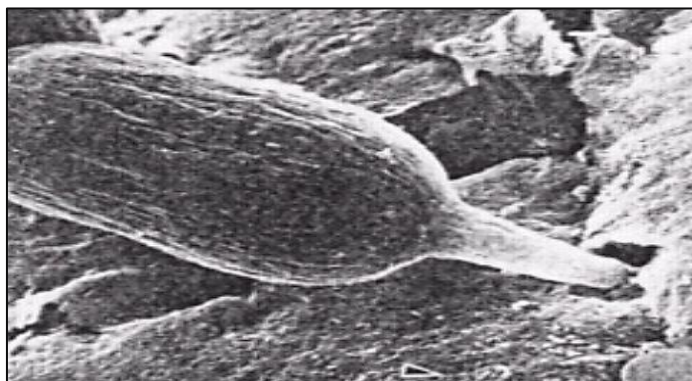
Leur concentration est plus faible,  $10^3$  à  $10^4$  cellule/ml. Ce sont des organismes pouvant ingérer des bactéries. Bien que les protozoaires produisent des enzymes qui participent



directement à la digestion, leur présence n'est pas indispensable à la vie des ruminants. Leur culture sur milieu synthétique est particulièrement difficile du fait de leurs exigences nutritionnelles et de leur sensibilité au changement physico-chimique du milieu.

La fonction cellulolytique a été observée chez plusieurs espèces de protozoaire cilié. Cependant la production de la cellulase par des bactéries intra-cellulaires n'est pas à exclure.

Les activités hémicellulolytiques et pectinolytiques sont observées chez une dizaine d'espèce: 10% de l'activité protéolytique et 30 à 40% de la fonction lipolytique sont assurées par les protozoaires ciliés.



**Figure 20** : Protozoaires flagellés

#### **II.2.2.1.2.3. Rôle des protozoaires**

La stratégie d'attaque de tissus végétaux par les protozoaires est différente de celle des autres microorganismes du rumen. Les protozoaires ciliés entodiniomorphes possèdent l'essentiel des enzymes impliquées dans la cellulolyse. Ils ingèrent les fibres, les mettant ainsi en contact étroit avec les enzymes dans le sac digestif, puis ils les digèrent dans leurs vacuoles digestives.

Les protozoaires peuvent ainsi s'insérer sous l'épiderme des parois végétales, partiellement dégradées, où se fixer par ingestion des parties fibreuses appartenant aux grosses particules alimentaires, où adhérer par la partie antérieure du protozoaire. Ils ont un rôle actif dans la digestion des aliments et la lyse partielle de leurs cellules au sein du rumen.

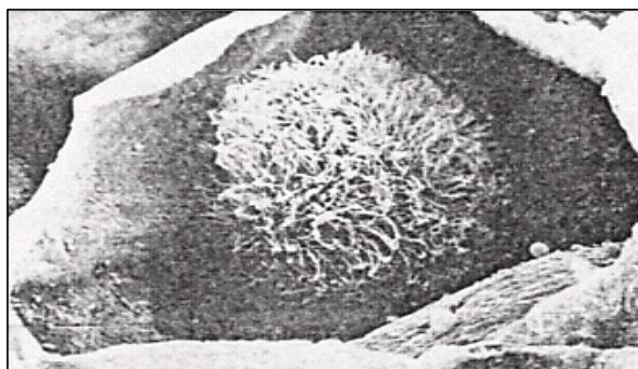
#### **II.2.2.1.3. Les champignons**

Les champignons du rumen sont anaérobies stricts et se fixent sur les particules végétales et les crampons appelés rhizoïdes. Ils représentent 8% de la biomasse microbienne total du rumen. *Neocallimastix frontalis*, *Piromonas communis*, *Neocallimastix jouhonii*, sont les principales espèces connues.

Tous les champignons sont presque des cellulolytiques et leurs cellulases sont les plus actives. Ils peuvent utiliser plusieurs variétés de glucide autant que source d'énergie, comme la cellulose, le cellobiose et le maltose. Certaines souches peuvent même utiliser l'amidon.

#### **II.2.2.1.3.1. Rôle des champignons**

Tous les champignons se trouvent fixés aux particules alimentaires. Ils colonisent préférentiellement les tissus lignifiés et séjournent le plus longtemps dans le rumen. Bien qu'ils se fixent principalement sur ces tissus, il n'existe aucune preuve qu'ils utilisent la lignine comme source de carbone.



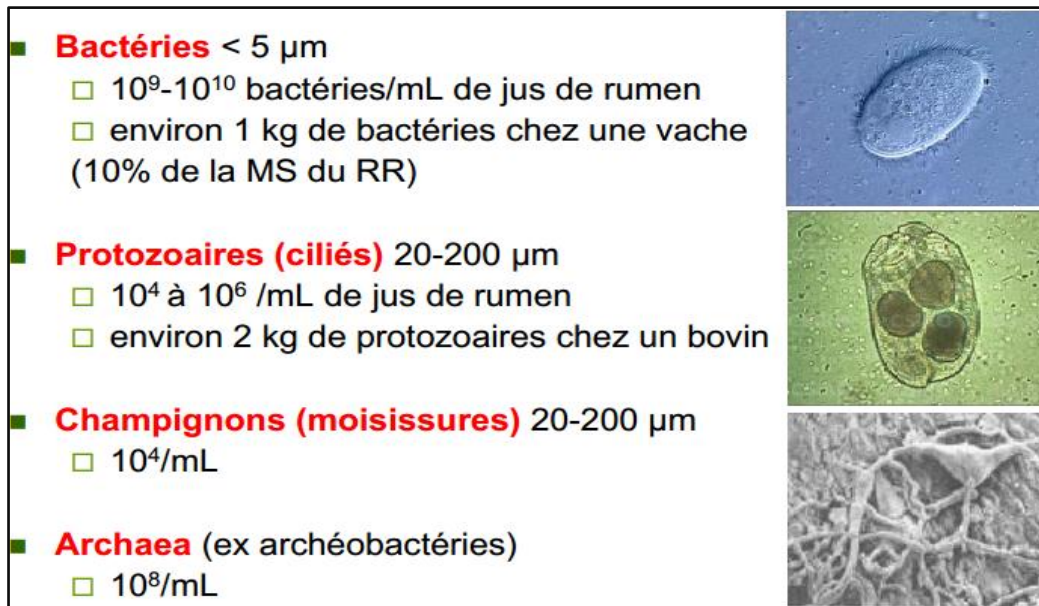
**Figure 21** : Champignons ruminants

#### **II.2.2.1.4. Mycoplasmes, virus et bactériophages**

On trouve également dans le rumen des virus, des mycoplasmes et différents types de bactériophages. Ils sont présents dans le rumen mais leurs rôles restent à élucider surtout pour les mycoplasmes.

Les bactériophages assurent le maintien de système tampon du rumen. Les bactériophages tempérés et virulents peuvent jouer un rôle essentiel dans l'écologie du rumen. A la suite d'une infection par un phage virulent, une espèce bactérienne peut devenir sous dominante. Son action pourra cependant être compensée par la prolifération d'une espèce non sensible, capable d'occuper la même niche écologique





**Figure 22** : population microbienne du rumen-réseau

### II.2.3. Les phénomènes chimiques

Les principaux phénomènes chimiques sont dus à des sécrétions digestives. Ces sécrétions contiennent d'une part des enzymes intestinales (pepsine, amylase pancréatique, lipase, trypsine, protéase, nucléase,...), d'autre part des substances non enzymatiques: acide chlorhydrique de la caillette, la bile et le mucus produit en différents segments du tube digestif (caillette, intestin).

L'intérêt de ces phénomènes (mécaniques, microbiens et chimiques) est la dégradation et la transformation des aliments aux nutriments simples facilement utilisable par l'hôte et les microorganismes.

### II.2.4. Conditions physico-chimiques dans le réticulo-rumen

La complexité anatomique de ces réservoirs est associée à la présence d'une population dense et stable de micro-organismes qui vivent en symbiose avec l'hôte jouent un rôle dans la digestion et la nutrition de l'animal.

La mise en place et le maintien de cette population microbienne sont dus au fait qu'il existe une séparation physique entre la zone de sécrétion acide (estomac proprement-dit) et le reste des pré-estomacs où la digestion microbienne peut avoir lieu en permanence. Le rumen abrite

donc des conditions physico-chimiques très particulières. Ces dernières permettent le développement d'un microbiote anaérobie très actif.

#### **II.2.4.1. Les différentes phases du contenu ruminal**

Le rumen a un volume moyen d'environ 150 L, dont 90 L de digesta. Ce contenu n'est pas réparti de façon homogène dans le rumen : en partie ventrale on retrouve la phase liquide, en partie intermédiaire la phase solide et en partie dorsale la phase gazeuse (figure23):

##### **II.2.4.1.1. La phase liquide**

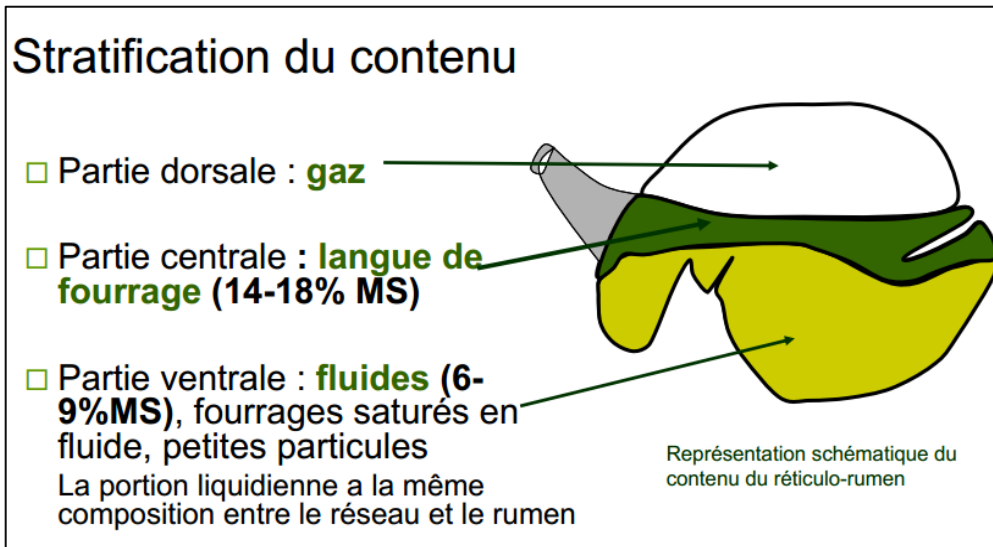
Cette phase a pour origine l'abreuvement (50 à 100L par jour), la salivation (80 à 200L par jour) et l'eau contenue dans les aliments. L'eau est le constituant principal du contenu ruminal (85%) et se trouve principalement dans la phase liquide dans laquelle flottent de fines particules en suspension (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 également essentielle aux réactions d'hydrolyse des polymères organiques.

##### **II.2.4.1.2. La phase solide**

La matière sèche (MS) de l'ensemble du contenu du rumen est de l'ordre de 15%. Celle-ci se concentre dans un amas fibreux en partie dorsale du rumen et a pour origine l'ingestion d'aliments. Une vache laitière en début de lactation peut ingérer entre 15 et 25 kg de MS.

##### **II.2.4.1.3. La phase gazeuse**

Cette phase est située entre l'amas fibreux de la phase solide et le plafond du rumen. Sa composition résulte des entrées d'air au moment de la déglutition, de la diffusion de gaz depuis les capillaires sanguins (en très grand nombre dans la muqueuse ruminale) et des activités microbiennes. Elle est composée de dioxyde de carbone (65%), de méthane (25 à 30%), de diazote (5%), de dihydrogène (1 à 2%) et de traces de dioxygène. La majeure partie de ces gaz est éliminée par l'éructation.

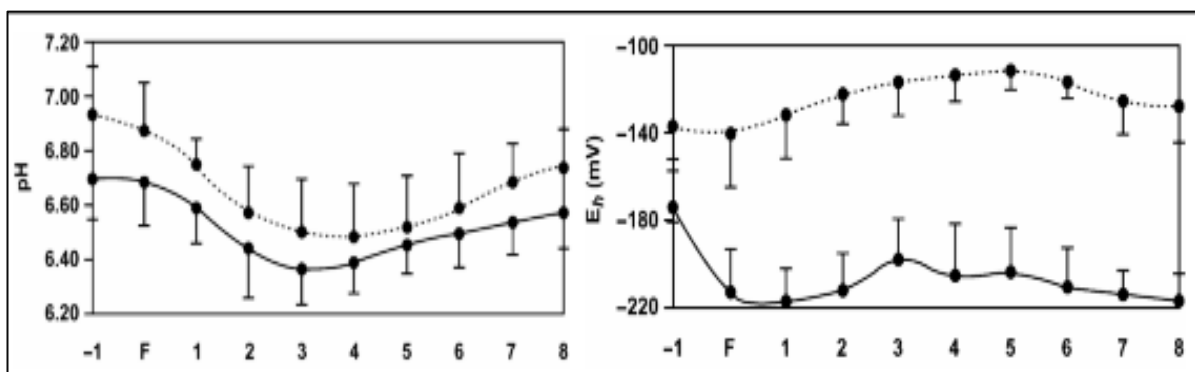


**Figure 23** : différentes phases du milieu ruminal

#### II.2.4.2. Le pH

Le pH ruminal est normalement compris entre 5,5 et 7. Ce pH est la résultante d'un équilibre entre des acides faibles et des bases faibles. Les principaux acides sont les AGV (acides gras volatiles) et l'acide lactique, produits des fermentations microbiennes. Les principales bases sont l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le bicarbonate et le phosphate. Le  $\text{NH}_3$  est le produit de la protéolyse, il peut également diffuser au travers de la paroi du rumen. Le bicarbonate et le phosphate sont principalement sécrétés par les glandes salivaires et jouent un rôle de tampon.

La figure suivante montre les variations du pH avant, pendant et après le repas. Dans les premières heures après le repas, les AGV produits par le microbiote vont abaisser le pH. Puis ce dernier remonte car les AGV sont absorbés par la muqueuse ruminale et la rumination induit l'arrivée de salive.



En abscisse : temps après le repas (h) ; en trait discontinu : échantillonnage à la main ; en trait continu : échantillonnage automatisé

**Figure 24** : Evolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction ruminiaux

#### **II.2.4.3. Le potentiel d'oxydo-réduction**

Le potentiel d'oxydo-réduction ruminal est toujours très nettement négatif (-150 à -250 mV) car le rumen est un milieu anaérobie réducteur. Les variations du potentiel d'oxydoréduction après le repas sont illustrées dans la figure ci-dessus : celui-ci augmente dans les heures suivant le repas (avec l'entrée d'oxygène pendant le repas et la rumination) et diminue ensuite.

En effet, en conditions physiologiques, le potentiel d'oxydo-réduction est rapidement corrigé par une partie du microbiote ruminal qui utilise le peu d'oxygène disponible. Il existe ainsi un gradient de potentiel d'oxydoréduction entre la surface et la profondeur. La consommation de dioxygène est si rapide que sa pénétration dans la masse digestive ne dépasse pas 0,5 cm.

#### **II.2.4.4. La température**

La température du réticulo-rumen est comprise entre 39 et 41°C, soit environ 1°C au-dessus de la température corporelle. Elle augmente en fonction de l'intensité des fermentations ruminales et est donc maximale dans les heures suivant le repas.

L'abreuvement peut faire chuter la température ruminale de 5 à 10°C, un délai de deux heures est nécessaire afin de retrouver la température initiale. Ainsi le pH, le potentiel d'oxydoréduction et la température ruminale permettent d'estimer l'intensité des fermentations ruminales.

En récapitulatif ; le contenu du milieu ruminal est relativement constant, il se caractérise par :

- une concentration élevée en eau 85 à 90 % ;
- une température constante de 39 à 40° C ;
- un potentiel d'oxydo-réduction variant entre de -250 à -400 mV (milieu fortement anaérorobie) ;
- un pH généralement compris entre 6 et 7 tamponné par l'apport régulier de grandes quantités de bicarbonates et de phosphates contenus dans la salive ;
- une pression osmotique constante proche de celle du sang ;
- un apport régulier de nutriments et d'eau fournis à la fois par l'ingestion des aliments et par la rumination ;
- une élimination continue des produits du métabolisme, soit par absorption à travers la paroi du rumen (acides gras volatils, ammoniac), soit par passage dans la partie postérieure du tube digestif (résidus alimentaires, cellules microbiennes), soit par éructation (méthane, gaz carbonique) ;

- une relative constance de l'atmosphère gazeuse située au niveau du sac dorsal (gaz carbonique : 60 –70 %, méthane : 30 – 40 %);
- un brassage permanent assuré par les contractions périodiques de la paroi et par la rumination.

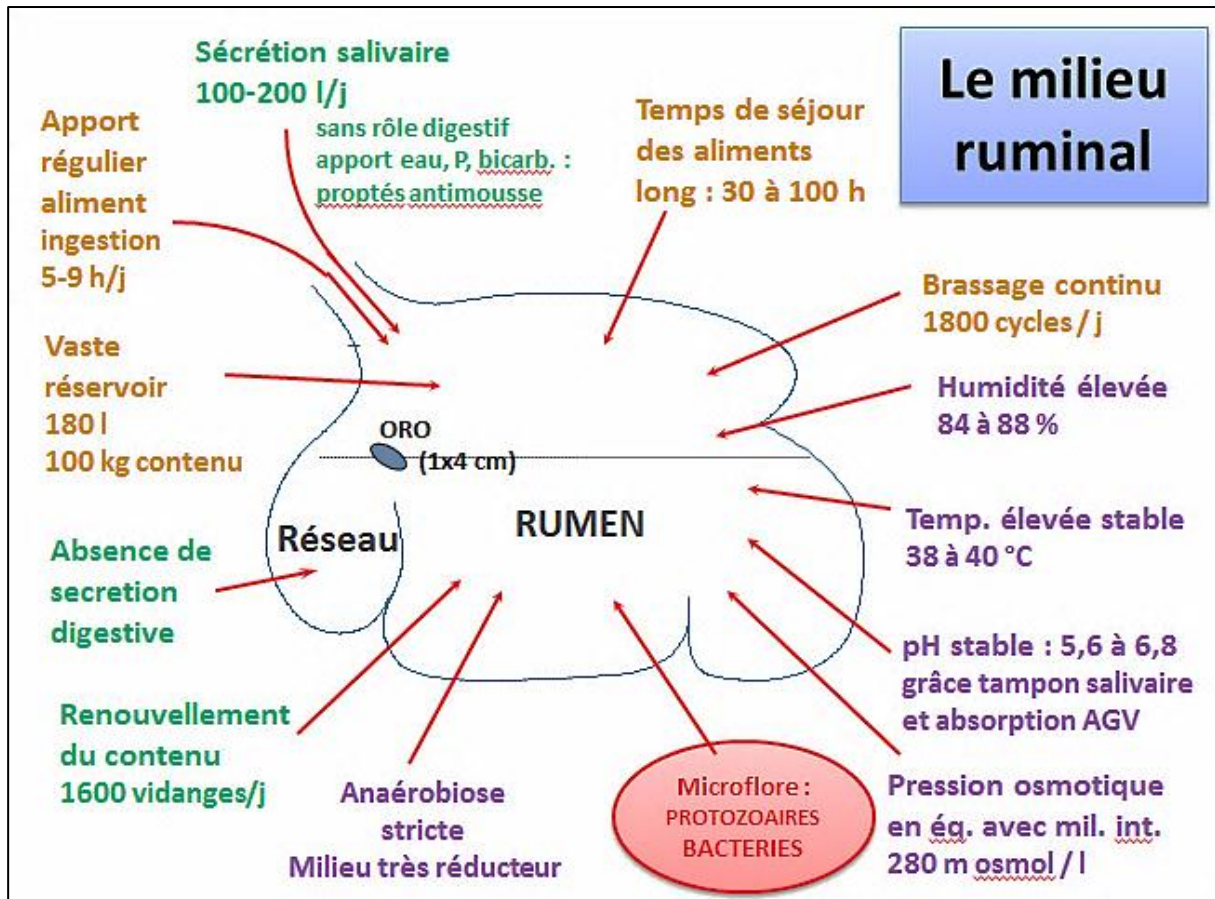


Figure 25 : Conditions physico-chimiques dans le réticulo-rumen

## **II.3. Digestion et utilisation digestive des nutriments**

### **II.3.1. Les glucides**

#### **II.3.1.1. Digestion dans le rumen-réseau**

Grâce à un extraordinaire équipement enzymatique, la population microbienne (cellulase, hémicellulase, des pectinases, des amylases...) du rumen-réseau hydrolyse tous les glucides en oses (hexoses ou pentoses).

##### **II.3.1.1.1. Les glucides solubles**

Les glucides solubles sont hydrolysés de manière très rapide et en totalité (amidon des céréales est dégradé à 90 - 95% dans le rumen par une amylase bactérienne).

Cette hydrolyse dépend de la nature des céréales de la ration : 90% environ pour l'orge et le blé, 70 à 80% pour le maïs ; En effet, l'amidon du maïs et plus encore du sorgho est dégradé de façon moins complète que celui de l'orge et du blé.

La digestion de l'amidon est influencée par la nature et la quantité de protéine : les microorganismes qui attaquent l'amidon ont besoin d'un niveau minimum de protéines pour satisfaire leur besoin azotés.

##### **II.3.1.1.2. Les glucides pariétaux**

La population microbienne dégrade aussi les glucides des parois (cellulose, hémicelluloses et pectines) en oses. Les sucres libérés par hydrolyse vont être absorbés et ensuite fermentés en anaérobiose en pyruvate par les voies d'Emden-Meyerhof et des pentoses phosphates.

Le pyruvate est un intermédiaire qui est rapidement utilisé. Il est catabolisé en AGV (acide acétique C2, acide propionique C3, acide butyrique C4 et une faible proportion d'AGV mineurs), dans certains cas en acide lactique, et en gaz (dioxyde de carbone, dihydrogène et méthane). L'énergie, libérée sous forme d'adénosine tri-phosphate (ATP), permettra la croissance microbienne. Les deux étapes de la dégradation des glucides sont illustrées dans la figure suivante.

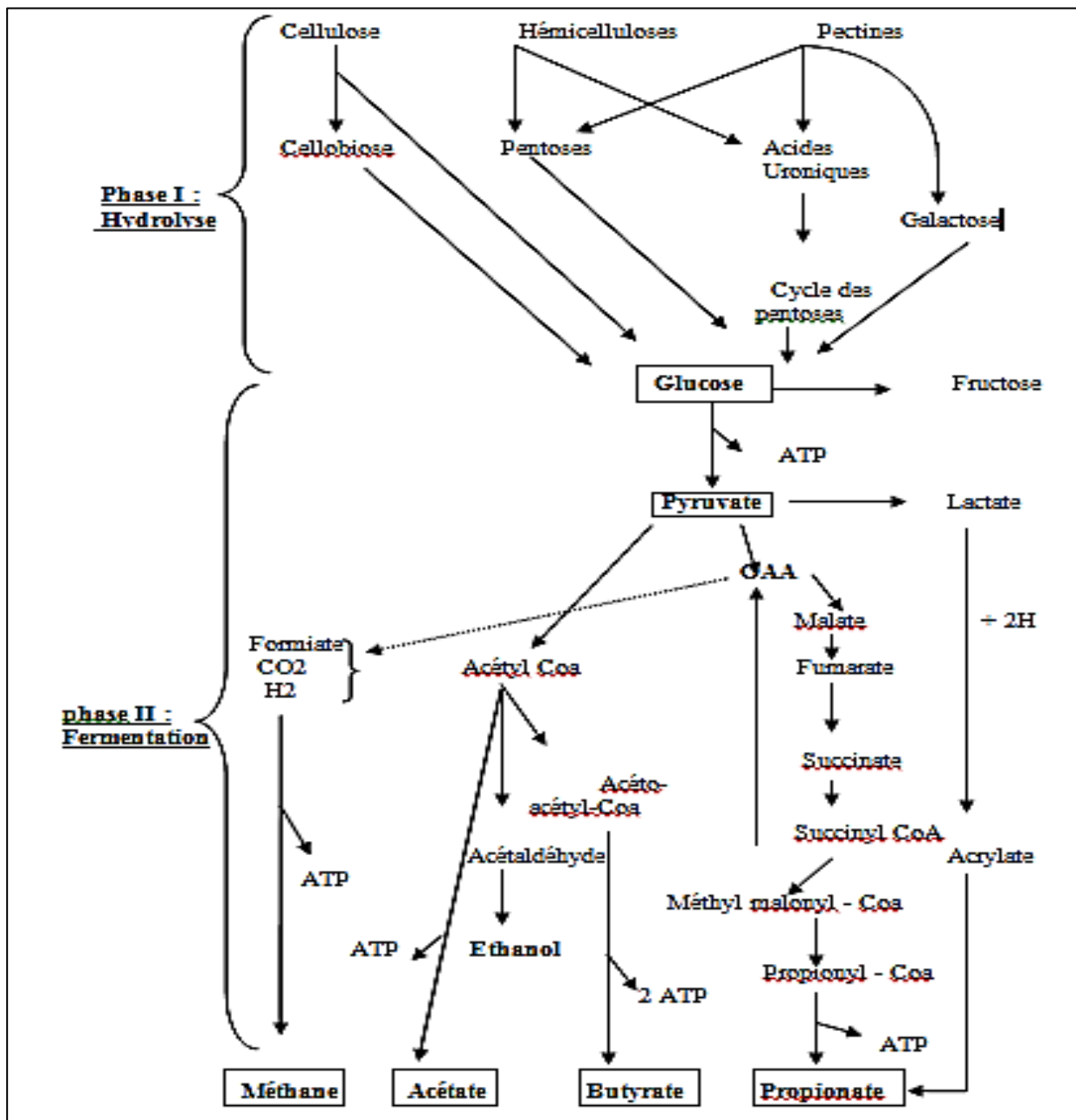


Figure 26: Dégradation des glucides pariétaux dans le rumen

Cette dégradation par des cellulases que seules les bactéries sont capables de synthétiser, est lente et partielle (de 80 à 90 % pour les fractions pariétales pour un aliment très peu lignifié comme l'herbe jeune, à 40 50 % pour une plante riche en lignine comme la paille). Cette hydrolyse libère du cellobiose (2 β glucose), du glucose et des pentoses.

La population microbienne du rumen -réseau tire de la fermentation des oses provenant de l'hydrolyse des glucides pariétaux, l'énergie (ATP) et le carbone qui lui sont nécessaires pour son entretien, sa croissance et sa prolifération.

### II.3.1.1.3. Les produits de la fermentation

Sont un mélange d'acides organiques à courte chaîne, dits acides gras volatils, essentiellement acétique, propionique et butyrique et des gaz (gaz carbonique et méthane). Les produits intermédiaires (acides succiniques et lactique) sont généralement utilisés par les microbes au fur et à mesure de leur formation.

Le ruminant trouve la majeure partie de l'énergie dont il a besoin dans les acides gras volatils (AGV) issus de la dégradation des glucides. Ils peuvent lui fournir de 65 à 75 % de l'énergie absorbée. Avec les régimes habituels à base de fourrage utilisés par les ruminants, les proportions relatives des AGV sont les suivantes (en % molécules) :

- Acide acétique (C2)                    60 à 70 %
- Acide propionique (C3)            15 à 20 %
- Acide butyrique (C4)                10 à 15 %
- Autres AGV                            2 à 5 %

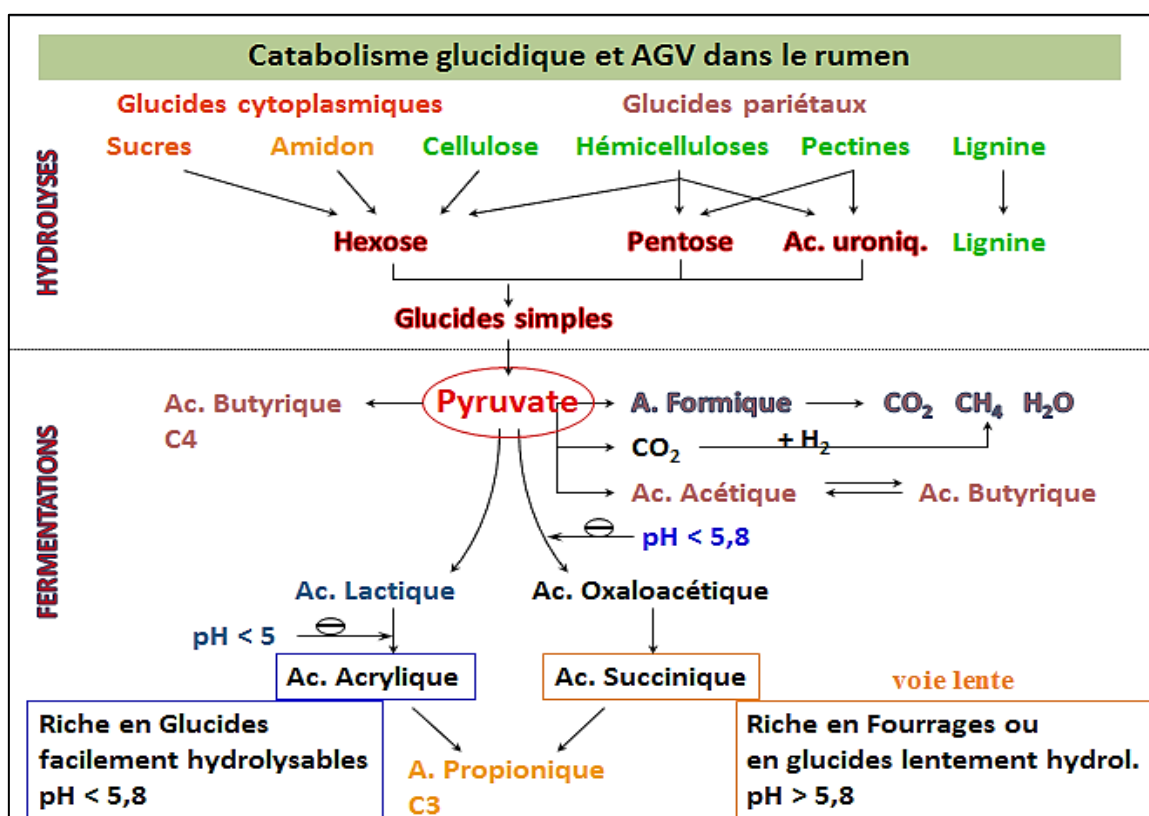


Figure 27: Voies de dégradation et l'utilisation des glucides par les bactéries ruminales



**II.3.1.1.4. Les facteurs influençant la proportion des acides gras volatils :** les proportions respectives en AGV dépendent de :

**II.3.1.1.4.1. la nature de la ration**

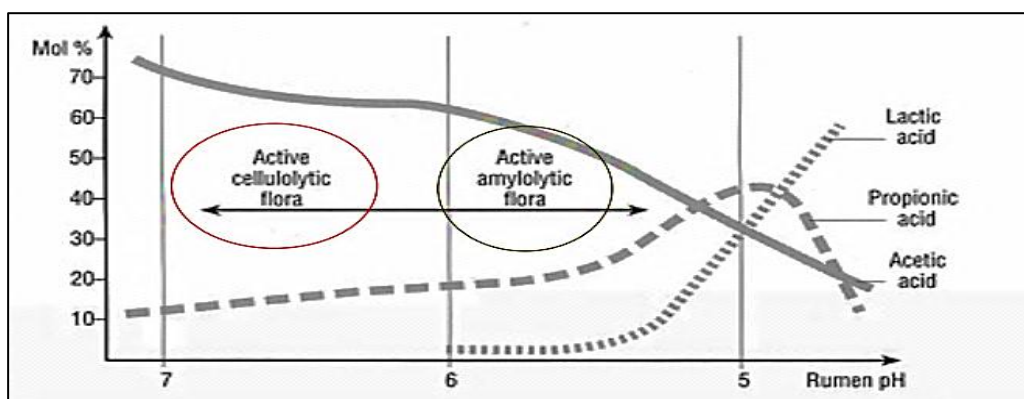
Une augmentation des teneurs en fibres provoque une augmentation de la proportion de C2 ruminal car les bactéries fibrolytiques utilisent plutôt la voie du C2. Une forte teneur en amidon (par exemple avec une forte proportion de céréales dans la ration) va favoriser la production de C3, au détriment de celle du C2. La présence de glucides solubles (saccharose, lactose, inuline), contenus dans des aliments tels que les betteraves ou le lactosérum, va augmenter la proportion de C4. Ce phénomène est illustré dans le tableau 2 qui compare les proportions d'AGV résultant de 4 rations différentes.

**Tableau 2 :** Influence de la nature de la ration sur les proportions molaires en AGV dans le rumen (valeurs moyennes durant les 5 heures après le repas)

Régime	AGV totaux (mmol/L)	Proportions molaires (%)			
		C2	C3	C4	AGV mineurs
Foin de graminées	90,0	72	17	7	4
Foin (44%) + orge (56%)	115,6	61	30	8	1
Foin (18%) + betteraves (82%)	127,5	56	26	17	1
Foin (52%) + lactosérum (48%)	99,9	59	16	21	4

**II.3.1.1.4.2. Le pH ruminal**

Il a également un effet sur les proportions d'AGV : sachant que les bactéries fibrolytiques se développent mieux à un pH supérieur à 6,5 et que les bactéries amylolytiques préfèrent un pH inférieur à 6, un pH bas engendrera des proportions de C3 plus élevées tandis qu'un pH haut provoquera de plus grandes proportions de C2.



**Figure 28 :** Adaptation de la fermentation ruminale consécutive d'une régulation du pH

#### **II.3.1.1.4.3. La vitesse de dégradation du substrat**

La quantité d'AGV dans le rumen dépend de la vitesse de dégradation du substrat. Plus ce substrat est dégradé rapidement, plus la quantité d'AGV produite est importante. Les fibres sont moins rapidement digérées que l'amidon (lent ou rapide). Ainsi de fortes proportions d'amidon rapide dans la ration entraînent une forte production d'AGV ruminiaux. Cela peut créer une baisse rapide du pH ruminal risquant de provoquer une acidose ruminale.

Le méthane représente environ 15% d'énergie perdue lors des fermentations ruminales. Il s'agit d'un gaz à effet de serre et il est produit en plus grande quantité par la voie du C2. En système intensif, la ration est composée de plus fortes proportions d'amidon qui favorisent la voie du C3, produisant de plus faibles quantités de méthane. Une vache au pré est sur ce point plus polluante que dans un système intensif. Les fermentations du microbiote produisent également de l'énergie thermique, c'est pourquoi la température ruminale est en moyenne plus élevée que la température corporelle. Néanmoins beaucoup de cette énergie thermique est perdue.

#### **II.3.1.1.4.4. L'intensité des fermentations microbiennes**

La production de ces gaz dépend de l'intensité des fermentations microbiennes ; elle augmente ainsi avec la digestibilité de la matière organique de la ration et diminue en fonction des facteurs qui limitent le temps de séjour des aliments dans le rumen (comme le broyage, l'agglomération, l'action des agents chimiques ou biologiques). La diminution du temps de séjour, modifie le temps de contact enzyme-substrat, accroît la surface pariétale accessible aux enzymes et réduit le nombre et la force des glucides –lignine qui limitent l'action des micro-organismes.

#### **II.3.1.1.5. Absorption des acides gras volatils**

Les AGV sont principalement absorbés par l'épithélium des papilles ruminales mais également à travers les parois du feuillet et du réseau. Ils représentent la source majeure d'énergie pour l'animal. Les activités du microbiote ruminal permettent donc la dégradation des fibres alimentaires et des glucides en général. L'énergie libérée permettra le fonctionnement du métabolisme microbien et notamment les synthèses protéiques. Les AGV produits seront utilisés par le ruminant comme source d'énergie.

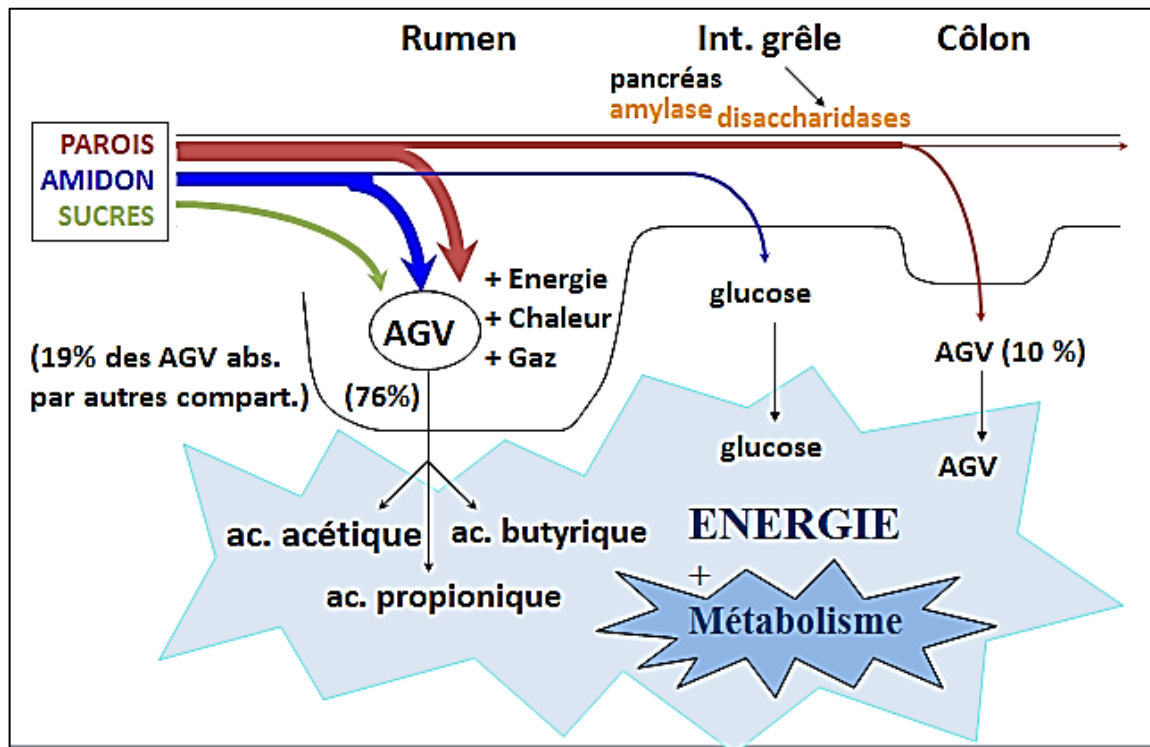


Figure 29: Digestion des glucides chez les ruminants

### II.3.1.2. Dans le feuillet

Longtemps considéré comme un lieu de passage et non d'absorption des nutriments. Le feuillet se remplit de façon cyclique par l'orifice réticulo-omasal qui laisse pénétrer les particules fines. Une partie des digesta s'écoule vers la caillette mais les deux tiers environ du flux digestif séjournent entre les lames du feuillet pendant une durée sans doute variable. La fraction lignocellulose indigestible séjourne environ 2 heures dans le feuillet.

Les digesta qui pénètrent dans l'omasum ont pour origine le contenu du plancher du réticulum et ont une teneur en matière sèche très faible de 3 à 8 %. Ce contenu réticulaire est renouvelé à chaque contraction par des digesta provenant du sac crânial du rumen. L'absorption omasale est réelle pour l'eau, les électrolytes et les AGV qui ont échappé à l'absorption du rumen et qui représentent environ 10 % de la production totale des AGV dans les pré-estomacs du mouton.

### II.3.1.3. Dans la caillette

Chez les ruminants, les aliments solides sont profondément dégradés dans le rumen-réseau sous l'action des micro-organismes et les corps bactériens constituent une part très importante de produits qui arrivent dans la caillette. Les digesta arrivent librement dans la caillette et y

séjourne très peu (30 à 60 minutes). Du fait du transit plus régulier et de la sécrétion plus importante d'acide chlorhydrique, le pH de la caillette fluctue moins et est en moyenne plus bas (2 à 3).

Ces conditions sont plus favorables à la dénaturation des matières azotées et à l'hydrolyse des protéines sous l'action de la pepsine mais le temps de séjour très bref provoque l'effet inverse.

L'acidité du milieu tue les protozoaires. Le lysozyme joue un rôle important chez le ruminant puisqu'il est sécrété en abondance, il intervient dans la lyse des parois bactériennes et facilite ainsi la dissociation des bactéries fixées et des particules.

On estime chez le mouton entre 30 à 70 % des microbes (bactéries et protozoaires) fixés aux particules provenant du rumen qui sont détachées dans la caillette. L'absorption porterait aussi sur les AGV non absorbés dans le feuillet.

#### **II.3.1.4. Dans les intestins**

##### **II.3.1.4.1. L'intestin grêle**

L'amidon échappé de la digestion microbienne, subit une dégradation chimique au niveau de l'intestin grêle, qui l'hydrolyse et le transforme en maltose puis en glucose. Le glucose produit est absorbé à travers la paroi intestinale.

La quantité de glucose absorbée représente moins de 1 % de l'énergie des nutriments absorbés avec les fourrages seuls. Elle ne devient notable qu'avec des rations mixtes contenant du maïs et du sorgho. Le ruminant doit donc synthétiser la quasi-totalité ou la majeure partie du glucose dont il a besoin. On estime que l'apport alimentaire de glucose fournit en moyenne 5% de l'énergie absorbée.

Les glucides pariétaux non dégradés dans le rumen – réseau ne seront pas aussi dégradés au niveau de l'intestin grêle.

##### **II.3.1.4.2. Le gros intestin**

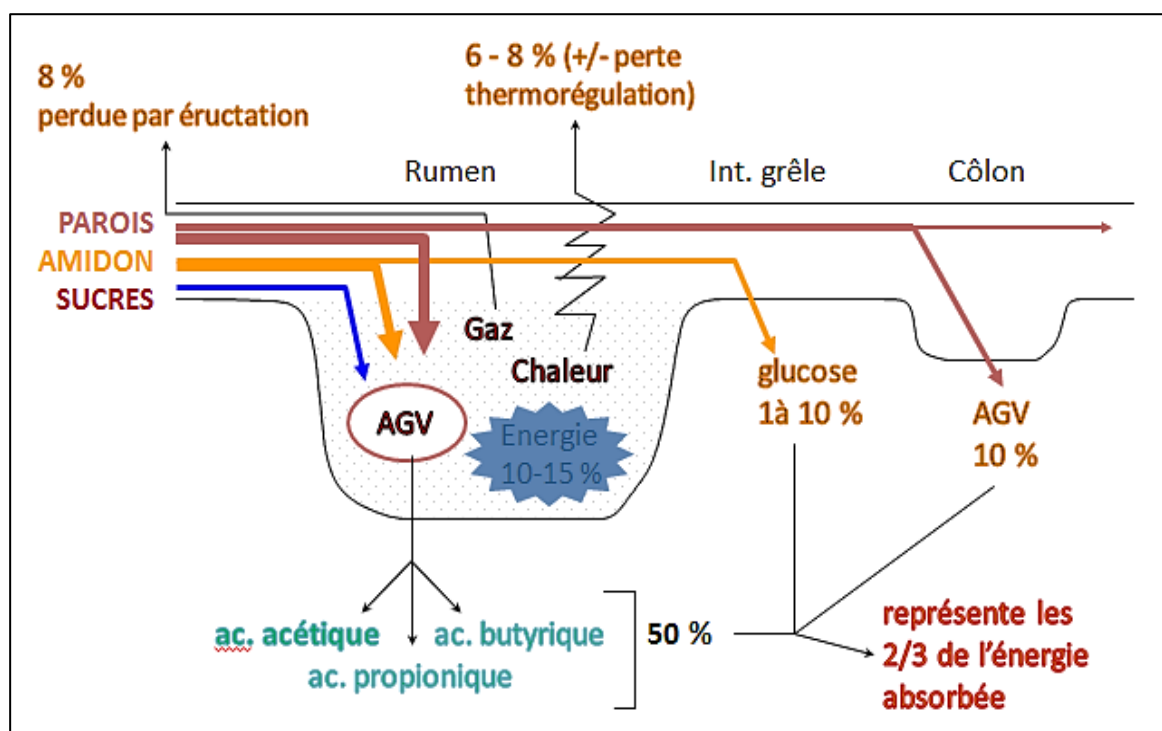
Le contenu du gros intestin constitue un milieu très favorable pour le développement d'une digestion microbienne. La température y est constante et le pH, peu variable, reste voisin de la neutralité (6.6 à 7.8).

Le temps de séjour des digesta dans le gros intestin du mouton varie de 10 à 29 heures, comparable à celui de la phase liquide du rumen-réseau, mais plus court que celui de la phase solide dans le même compartiment. Il diminue quand le niveau de l'ingestion augmente. La population microbienne du gros intestin est caractérisée par des bactéries peu différentes de celles du rumen-réseau mais en quantités moins importantes. La présence de protozoaires

reste incertaine et il existe peu de données sur les champignons bien que certains auteurs signalent leur présence dans le gros intestin des grands ruminants.

Seuls les glucides pariétaux (cellulose et hémicelluloses) non digérés dans le rumen arrivent dans le gros intestin, aucun glucide soluble n'est détecté dans les digesta de l'iléon lorsqu'on est en présence d'une ration à base de fourrages classiques. Cependant, la quantité de glucides solubles arrivant dans le gros intestin peut augmenter avec des rations à base de céréales et surtout le maïs et le sorgho où une grande quantité d'amidon peut échapper à la dégradation ruminale.

La population microbienne du cæcum et du colon utilise ces glucides en produisant des acides gras volatils comme dans le rumen mais avec une quantité moindre. Les AGV absorbés à ce niveau représentent une fraction très variable, de 4 à 26 % de l'énergie totale digérée. La production et l'absorption des AGV à ce niveau sont nettement inférieures à celle du rumen. Les fractions pariétaux non digères ou indigestibles sont éliminés ensuite par les fèces.



**Figure 30:** Bilan de la digestion des glucides chez les ruminants

## **II.3.2. Les matières azotées :**

### **II.3.2.1. Digestion dans le rumen-réseau**

Les matières azotées alimentaires dans le rumen sont d'abord hydrolysées en peptides, puis acides aminés, ensuite sont désaminés en ammoniac, qui est le produit terminal de la protéolyse microbienne. La résistance à la dégradation ruminale varie fortement en fonction de la nature de l'aliment. En général, les protéines des fourrages sont plus dégradées (60 à 80%) que celles des concentrés (20 à 60%). L'ammoniac formé est soit utilisé par la population microbienne, ou, passe vers le foie où il est convertit en urée. L'absorption de l'ammoniac est conditionnée par sa concentration dans le rumen (50 à 80 mg/ 100 ml de jus de rumen), et par le pH du rumen (pH élevé, absorption rapide).

Au niveau intestinal, en moyenne, 60% des acides aminés absorbés dans l'intestin grêle proviennent des bactéries ruminales, et les 40% qui restent sont les protéines alimentaires qui ont échappé à la dégradation ruminale. En général, plus de 80% des protéines qui arrivent dans l'intestin sont digérées; le reste passe dans les matières fécales.

- **Les pertes azotées :** chez la chèvre en lactation une portion de l'azote ingéré est perdue par l'urine (43 %), les fèces (29 %), et une partie excrétée dans le lait (24 %). Ces pertes sont liées à la nature de la ration (riche ou pauvre en matières azotées), la consommation d'hydrate de carbone, et le contenu de régime en lignine. En plus, ces pertes sont sous l'influence de l'équilibre du milieu ruminal (dégradation des matières azotées et l'énergie fermentescible).

#### **II.3.2.1.1. Dégradation de l'azote**

La protéolyse est principalement réalisée par les bactéries et les protozoaires. Les champignons interviennent dans une moindre mesure. Ces microorganismes ruminiaux dégradent une fraction des protéines alimentaires. Cette dégradation engendre tout d'abord des peptides puis des acides aminés et enfin de l'ammoniac. L'azote non protéique est, quant à lui, rapidement dégradé en  $\text{NH}_3$ : produit terminal le plus important

Cette dégradation en ammoniac correspond à *la phase de protéolyse microbienne* est rapide et totale pour les constituants non protidiques (urée, amides ...) ainsi que pour les constituants protidiques simples (acides aminés libres, peptides et polypeptides).

Ensuite, les substrats carbonés et l'ammoniac peuvent être utilisés pour la synthèse des matières azotées de certaines bactéries (cellulolytiques) ce qui correspond à *la phase de protéosynthèse microbienne*.

### II.3.2.1.1.1. Protéolyse

La première étape de la dégradation des protéines résulte de l'activité des protéases bactériennes. C'est principalement les bactéries amylolytiques qui interviennent dans la protéolyse : elles dégradent principalement les protéines solubles. Les protozoaires participent plutôt à la dégradation des protéines insolubles incluses dans des particules de taille appropriée telles que des chloroplastes ou des bactéries qu'ils ingèrent.

### II.3.2.1.1.2. Hydrolyse des peptides

Les peptides sont rapidement hydrolysés. 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. De plus, les bactéries, ayant la capacité d'assimiler des peptides de petite taille, vont les dégrader en acides aminés à l'aide d'enzymes intracellulaires.

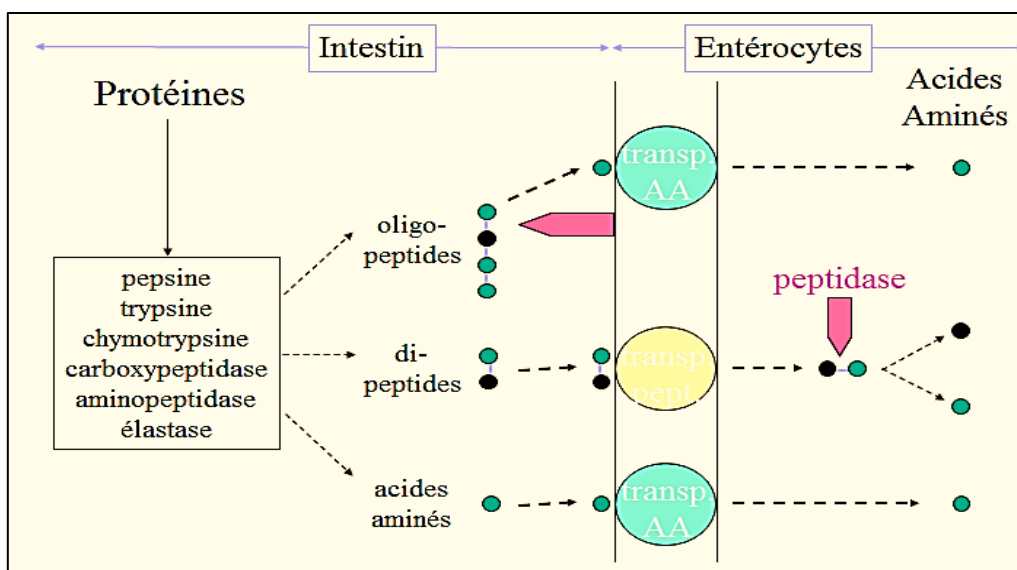


Figure 31: digestion et absorption des protéines

### II.3.2.1.1.3. Dégradation des acides aminés

Les acides aminés, d'origine alimentaire ou produits de l'hydrolyse des protéines, sont soit désaminés en  $\text{NH}_3$  et en AGV, soit incorporés dans les protéines bactériennes (protéosynthèse microbienne).



### II.3.2.1.1.4. Devenir des autres composés azotés de la ration

Les acides nucléiques représentent 5 à 10% des matières azotées présentes dans les rations des ruminants. Ces molécules proviennent également des fragments desquamés de l'épithélium ruminal et des microorganismes lysés. Ils sont rapidement dégradés et peuvent être utilisés par les microorganismes comme source d'énergie et d'azote.

L'urée, d'origine alimentaire ou salivaire, est très rapidement hydrolysée par des uréases bactériennes : cela engendre la production de  $\text{NH}_3$ . Les nitrates sont réduits en nitrites puis en  $\text{NH}_3$ .

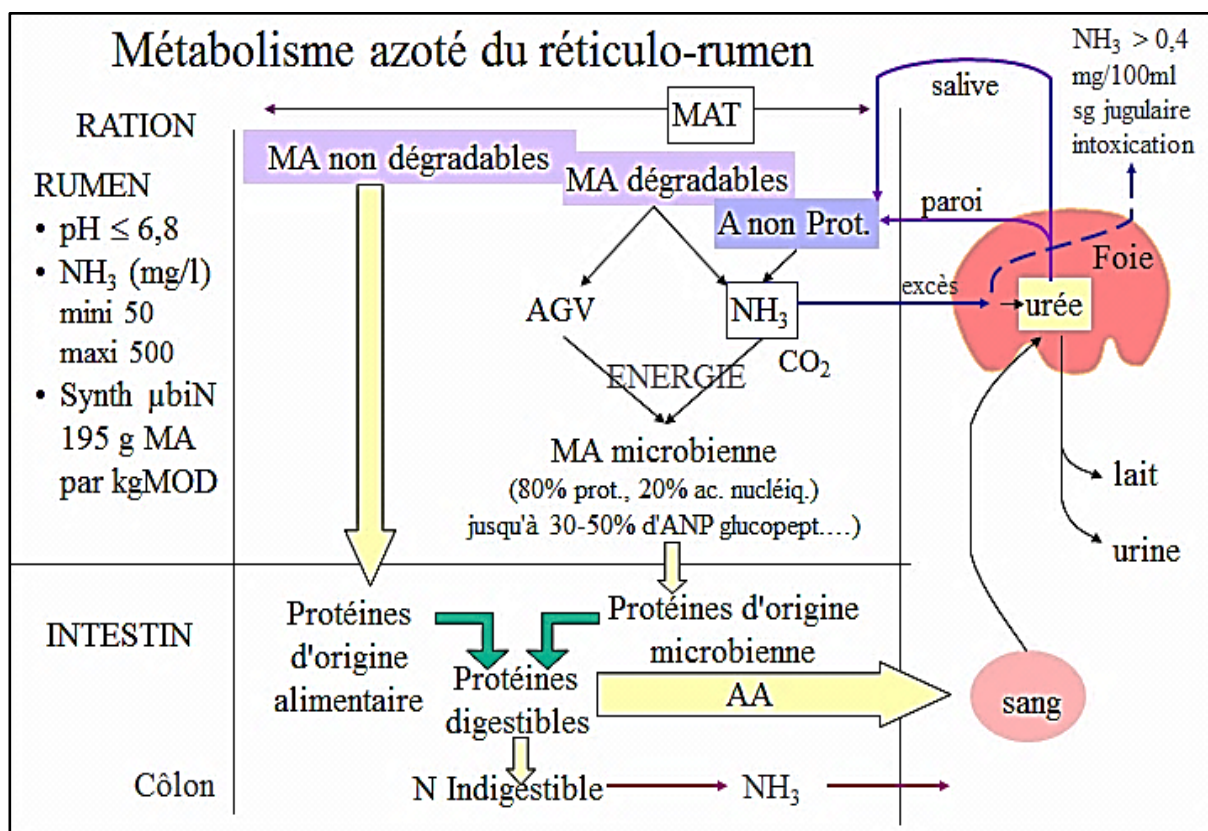


Figure 32 : Utilisation digestive des matières azotées totales

### II.3.2.1.1.5. L'uréogénèse à partir de l'ammoniac

La dégradation des matières azotées entraîne la production de  $\text{NH}_3$ . Ce dernier sera utilisé par le microbiote pour la synthèse de nouveaux acides aminés. Dans la mesure où  $\text{NH}_3$  n'est pas utilisé par les micro-organismes pour cette synthèse de matières azotées microbiennes (protéines microbiennes), la majeure partie de l'ammoniac restant est absorbé au niveau de la paroi du rumen, véhiculé au foie où il est transformé en urée. Cette urée est en partie recyclée dans la salive ou par diffusion à travers la paroi de tout le tube digestif et/ou en partie



### **II.3.2.2. Dans l'intestin grêle**

Les protéines qui arrivent au niveau du duodénum sont de deux types : alimentaires et microbiennes. Il est admis que 80 % des protéines microbiennes se trouvent sous forme de protéines vraies et 20 % sous forme d'acides nucléiques qui n'auraient aucune valeur pour l'animal. La digestion et l'absorption des protéines auraient lieu principalement dans le deuxième tiers de l'intestin grêle ; elles seraient donc faibles dans l'iléon malgré ses capacités élevées entre autre un pH de 7.5 favorable à l'action des enzymes protéolytiques.

L'analyse de 405 bilans réalisés sur des moutons ,jeunes bovins et vaches laitières recevant des rations mixtes ou des fourrages verts distribués seuls , le flux d'azote à l'entrée du duodénum est pour

- 56 % d'origine microbienne (37 à 88 %)
- 38 % d'origine alimentaire (10 à 60 %)
- 6 % d'origine endogène.

La digestibilité des protéines dans l'intestin grêle varie considérablement de 0.5 à 0.80. Elle est estimée à 0.80 pour les protéines d'origine microbienne et de 0.25 à 0.95 pour les protéines alimentaires.

Pour un niveau d'alimentation donné, elle est liée positivement au flux duodéal de protéines et négativement au flux iléal de matière non protidique.

Les protides qui échappent à la digestion dans l'intestin grêle sont donc constitués principalement de fractions communes d'origines bactérienne et endogène, auxquelles vient se rajouter une fraction d'origine alimentaire, moins importante et de composition variable.

### **II.3.2.3. Dans le gros intestin**

Les bactéries du cæcum et du côlon proximal ont une importante activité de protéolyse, de désamination, de décarboxylation et d'uréolyse. La dégradation des protéines aboutit à la formation des acides aminés eux-mêmes dégradés en ammoniac, acides gras volatils et méthane.

Le métabolisme de l'azote dans le gros intestin apporte peu d'acides aminés à l'animal (6 % maximum des apports) mais le gros intestin participe de façon importante au recyclage de l'urée participant de ce fait pour 40 % au transfert net d'azote de l'ensemble du tube digestif aux liquides corporels.

Le gros intestin joue un rôle important dans le recyclage de l'ammoniac au cours de la digestion des parois végétales ; surtout lors d'une diminution du temps de séjour des digesta dans le rumen suite à un niveau alimentaire élevé. Aussi, lors de la diminution de l'activité cellulolytique entraînée par des régimes riches en amidon rapidement fermentescible.

La quantité d'azote qui arrive dans le cæcum représente :

- \* 25 à plus de 50 % de la quantité d'azote ingérée (avec les rations pauvres en azote) ;
- \* La moitié de cet azote est sous forme soluble ;
- \* Jusqu'à 17 % sous forme ammoniacale ;
- \* Les protéines représentant 40 à 80 % de cet azote, sont d'origine alimentaire, microbienne et endogène auxquelles il faut ajouter l'azote provenant du mucus sécrété par la paroi du gros intestin, les cellules desquamées.
- \* l'urée provenant du sang et diffusant à travers la paroi.

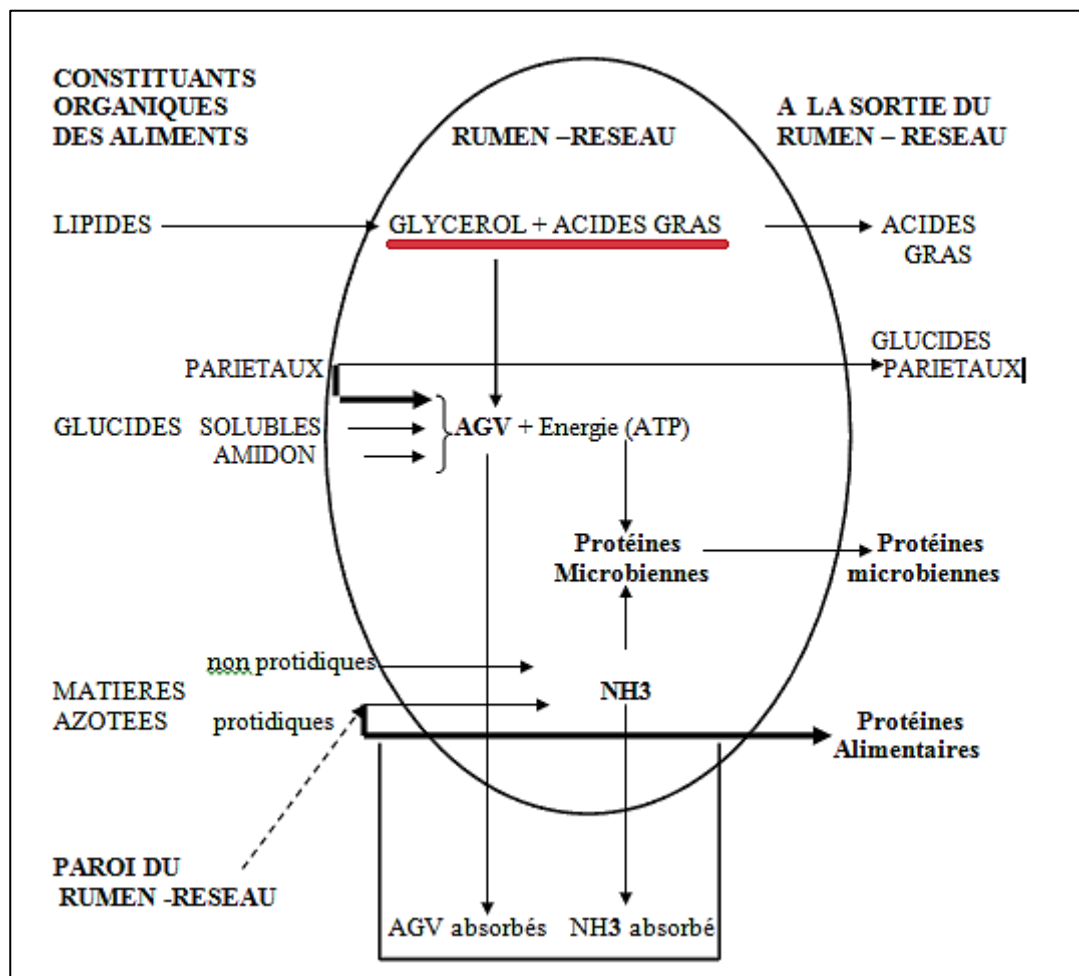
### **II.3.3. Les lipides :**

#### **II.3.3.1. Dans le rumen :**

Le métabolisme ruminal des lipides est effectué en deux étapes : la lipolyse, suivie de la biohydrogénation. Cette deuxième étape entraîne le remaniement des acides gras alimentaires et donc la production de nombreux isomères de ces acides gras. De plus, les bactéries ont la capacité de synthétiser de nouveaux acides gras.

A cet effet, la majorité des lipides alimentaires ne sont pas digérés, mais ils sont hydrolysés complètement et quasi totalement par des lipases extracellulaires sécrétés par des souches bactériennes lipolytiques (comme *Anaerovibrio lipolytica*).

Cette hydrolyse permet la libération de glycérol et des acides gras. Le glycérol fermenté rapidement en AGV principalement le propionate et le butyrate. Pour les acides gras, une partie est utilisée par les bactéries pour la synthèse des phospholipides de la membrane bactérienne. En plus, les bactéries hydrogénéisent les acides gras pour former des acides gras saturés. L'autre partie des acides gras semble être catabolisée et/ou absorbée à travers la paroi ruminale.



**Figure 34 :** Dégradation des constituants organiques alimentaires dans le réticulo-rumen

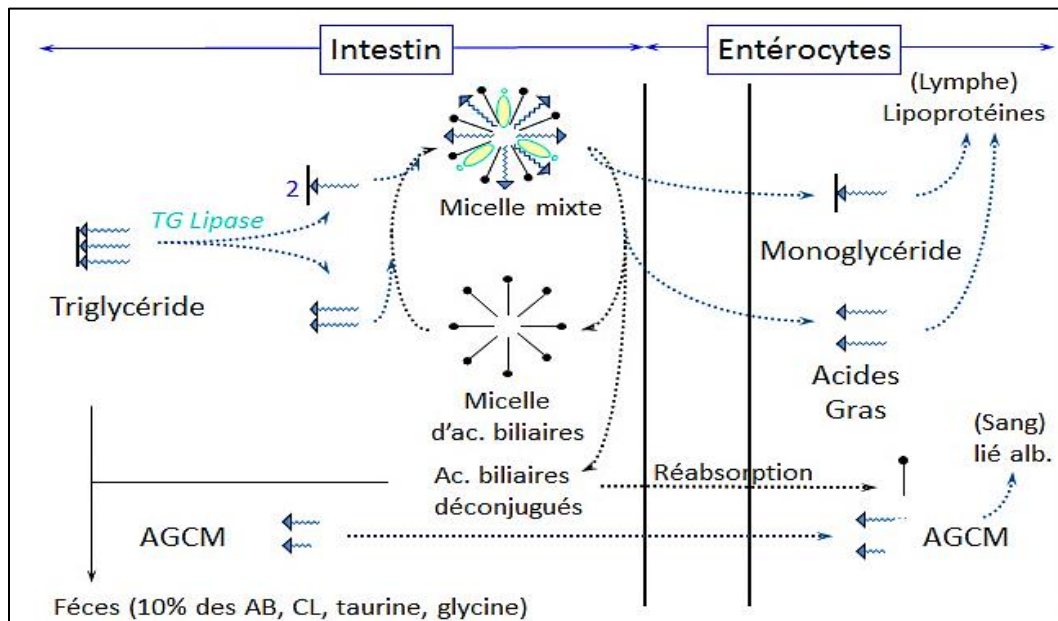
### II.3.3.2. Dans les intestins

Au niveau intestinal, les phospholipides microbiens avec d'autres acides gras sont digérés (l'action de la bile et des sécrétions pancréatiques) puis solubilisés dans la phase micellaire pour être absorbés à travers la paroi intestinale.

Les lipides sont efficacement digérés dans l'intestin, grâce à la bile et au suc pancréatique ; la bile joue un rôle particulièrement important en apportant des phospholipides qui facilitent la mise en solution micellaire des acides gras insaturés.

Dans le duodénum, l'apport de lipides par la bile entraîne une augmentation marquée des quantités d'acides gras insaturés, de phospholipides et de cholestérol. Chez le mouton, la quantité totale de lipides ainsi sécrétée équivaut à environ 50 % de la quantité ingérée avec des rations classiques non supplémentées en lipides.

La digestion des lipides se produit dans un milieu bi-phasique constitué d'une phase particulaire insoluble et d'une phase micellaire soluble. Cependant et contrairement à ce qui est observé chez les pré-ruminants, la phase insoluble n'est pas une émulsion de globules gras stabilisée par les phospholipides et les sels biliaires, puisque les lipides sortant de la caillette sont liés à des débris végétaux, à des corps microbiens ou à des cellules desquamées. Les acides gras non estérifiés sont progressivement transférés dans la phase micellaire soluble, grâce à l'action détergente des lyso-lécithines et des sels biliaires.



**Figure 35:** Digestion et absorption des lipides

Cependant très peu de données sont disponibles sur la digestibilité des lipides dans l'intestin grêle. Le plus souvent, les mesures ont été effectuées à l'entrée du duodénum et dans les fèces or le passage dans le gros intestin entraîne des modifications profondes et variables.

La figure suivante renseigne sur la dégradation des différents constituants alimentaires grâce à l'intervention de la microflore bactérienne ainsi que l'utilisation digestive et métaboliques des nutriments chez les ruminants

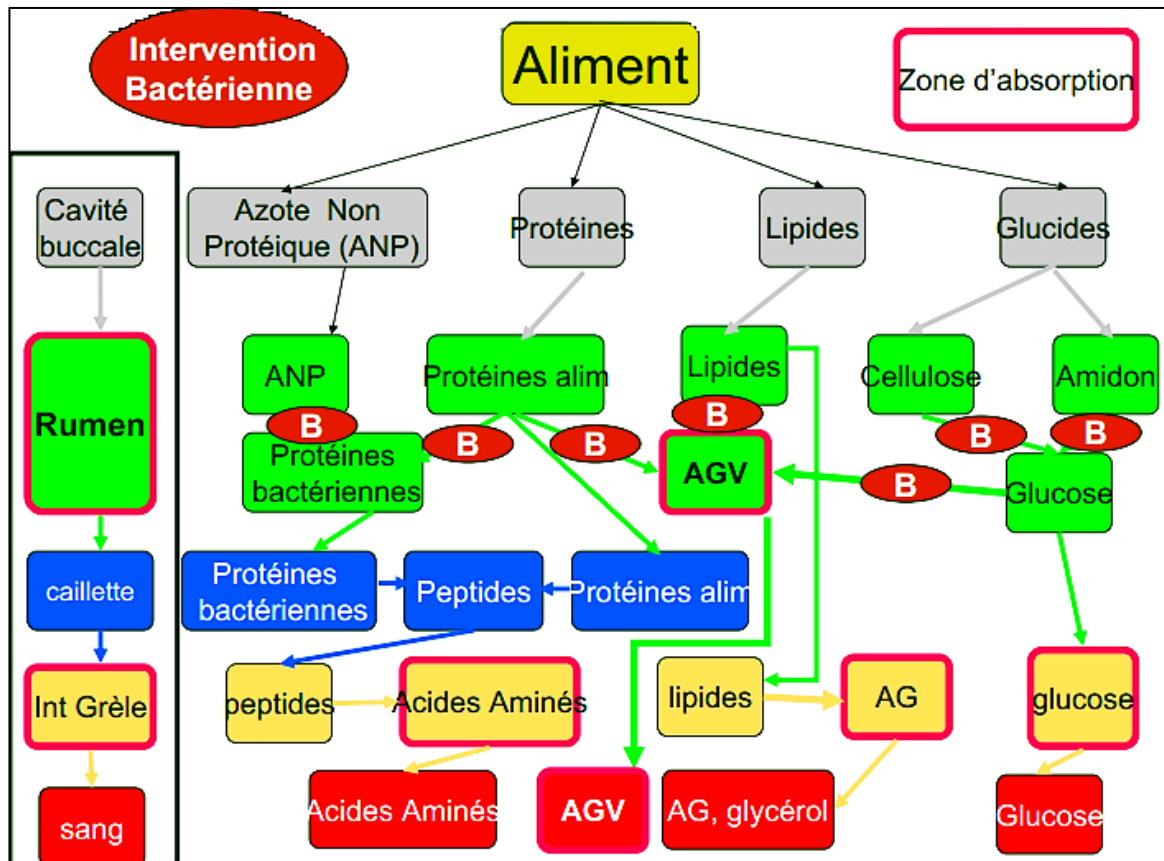


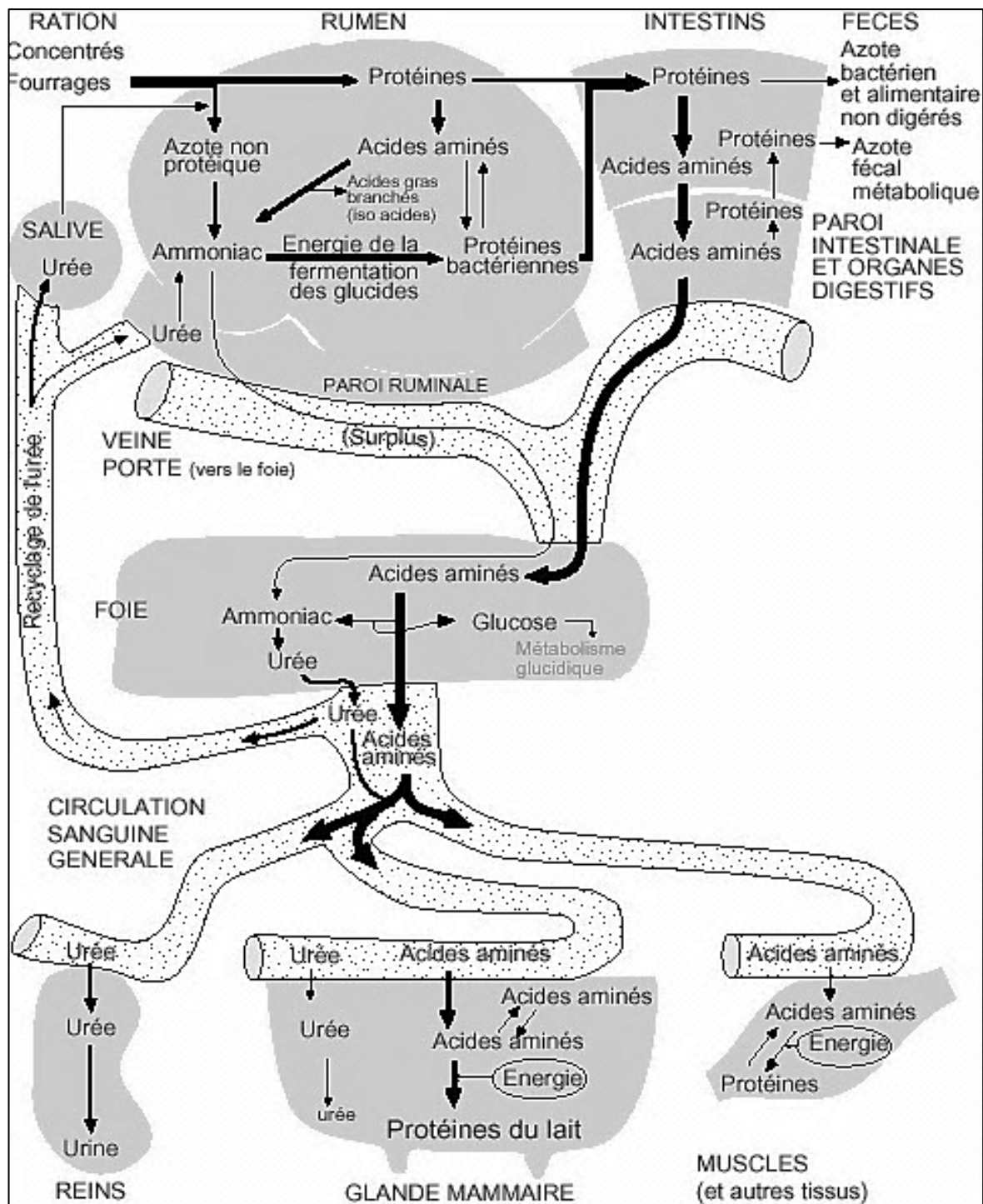
Figure 36 : Utilisation digestive et métaboliques des nutriments chez les ruminants

### II.3.4. Absorption d'eau et de minéraux

Outre le feuillet, le gros intestin joue un rôle important dans l'absorption de l'eau et de certains minéraux majeurs comme chez toutes les espèces. Chez les ruminants environ 90 % de l'eau entrant dans le gros intestin du mouton y est absorbée, la teneur du contenu du gros intestin décroît régulièrement de 7.1g d'eau par g de MS dans le cæcum à 1.5g dans le rectum chez le mouton.

Le gros intestin est aussi un lieu d'absorption de nombreux éléments minéraux avec une prédominance d'absorption du sodium, en grande partie d'origine endogène, du phosphore, calcium, et magnésium ainsi que le chlore alors que le potassium n'y est que faiblement absorbé. Il existe aussi une absorption importante des oligo-éléments comme le zinc, cobalt, cuivre et du manganèse.





**Figure 37:** Schémas général résumant de digestion, absorption et métabolisation des aliments consommés par les ruminants

### **III. UTILISATION METABOLIQUE DES NUTRIMENTS**

Après leur absorption, les nutriments énergétiques et plastiques sont transportés par le sang jusqu'au foie, puis apportés aux cellules où ils vont participer à une multitude de réactions chimiques nécessaires à la vie, qui constituent le métabolisme.

#### **III.1. Métabolisme du glucose**

Le glucose est le principal monosaccharide contenu dans le sang ; c'est un substrat qui fournit l'énergie indispensable aux fonctions cellulaires.

La dégradation du glucose se déroule en deux étapes dont la première est une glycolyse qui conduit à l'acide pyruvique avec un carrefour important constitué par les trioses phosphates qui sont les précurseurs du glycérol lui-même à la base de la synthèse des lipides corporels.

Par la suite, le cycle de Krebs, qui constitue le système qui permet de dégrader les produits terminaux des métabolismes des oses, des acides gras et de nombreux acides aminés en permettant la production de la plus grande partie de l'énergie dont les cellules ont besoin.

Chez les ruminants, contrairement aux monogastriques, le glucose sanguin provient très peu de l'alimentation, d'une part parce que celle-ci en contient très peu, et d'autre part parce qu'il est utilisé par les microorganismes du rumen.

Par conséquent, seule une faible quantité de glucose est absorbée au niveau intestinal à partir de l'amidon et des glucosanes microbiennes. Cette quantité reste limitée à 15 % du total et qui n'a qu'un effet temporaire sur le taux sanguin. L'organisme doit donc le synthétiser et de nombreuses voies métaboliques permettent de maintenir la glycémie.

Tout d'abord la glycogénolyse, cependant les réserves en glycogène sont faibles et leur durée de vie est limitée chez les ruminants. Ces animaux doivent donc produire 90% du glucose qui leur est nécessaire via la néoglucogenèse au niveau hépatique

##### **III.1.1. La néoglucogenèse**

La principale voie de production de glucose reste la néoglucogenèse (NGG) qui fournit 85 % du total, principalement dans le foie et à un moindre degré au niveau rénal, à partir de substances glucoformatrices.

Le principal précurseur est le propionate (C3) qui fournit jusqu'à 60% du glucose dont environ 90% est capté par le foie et transformé en glucose via le succinyl CoA. Cette réaction nécessite également de la vitamine B<sub>12</sub>, synthétisée par les microorganismes du rumen à partir



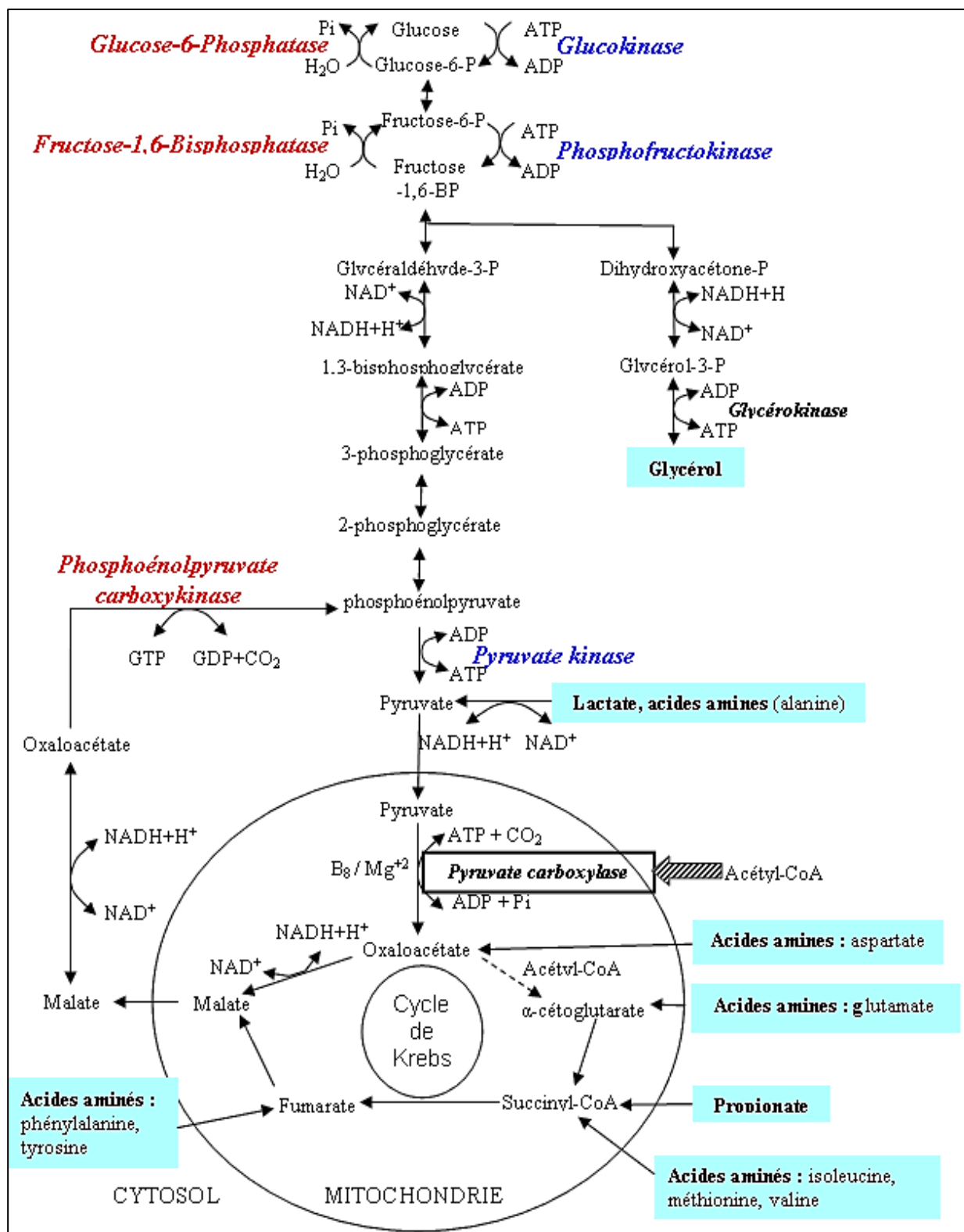


Figure 39 : Intervention des différents glucoformateurs dans la néoglucogénèse

### III.2. Métabolisme des lipides

Les acides gras des lipides sont absorbés au niveau de l'intestin grêle, après leur solubilisation dans la phase micellaire. Les acides gras absorbés sont estérifiés en triglycérides, transportés par la lymphe et déversés dans le sang sous forme de chylomicrons utilisés par le tissu adipeux et la glande mammaire.

Donc, les chylomicrons sont la forme alternative de transport des lipides à partir de l'intestin grêle par l'intermédiaire des vaisseaux lymphatiques vers la circulation sanguine où ils sont utilisés par les tissus cibles sans être d'abord métabolisés par le foie.

Le long temps de séjour des aliments dans le rumen, et sa vidange continue, se traduisent par une certaine permanence de l'absorption des nutriments au cours du nyctémère, augmentant le temps nécessaire pour atteindre un état de jeûne véritable. Ce phénomène, combiné à la faible teneur en lipides du régime alimentaire et à l'hydrogénation importante des acides gras en acide stéarique et en acides gras mono-insaturés, explique la pauvreté du plasma des ruminants en lipoprotéines de très basse densité (VLDL) et en chylomicrons.

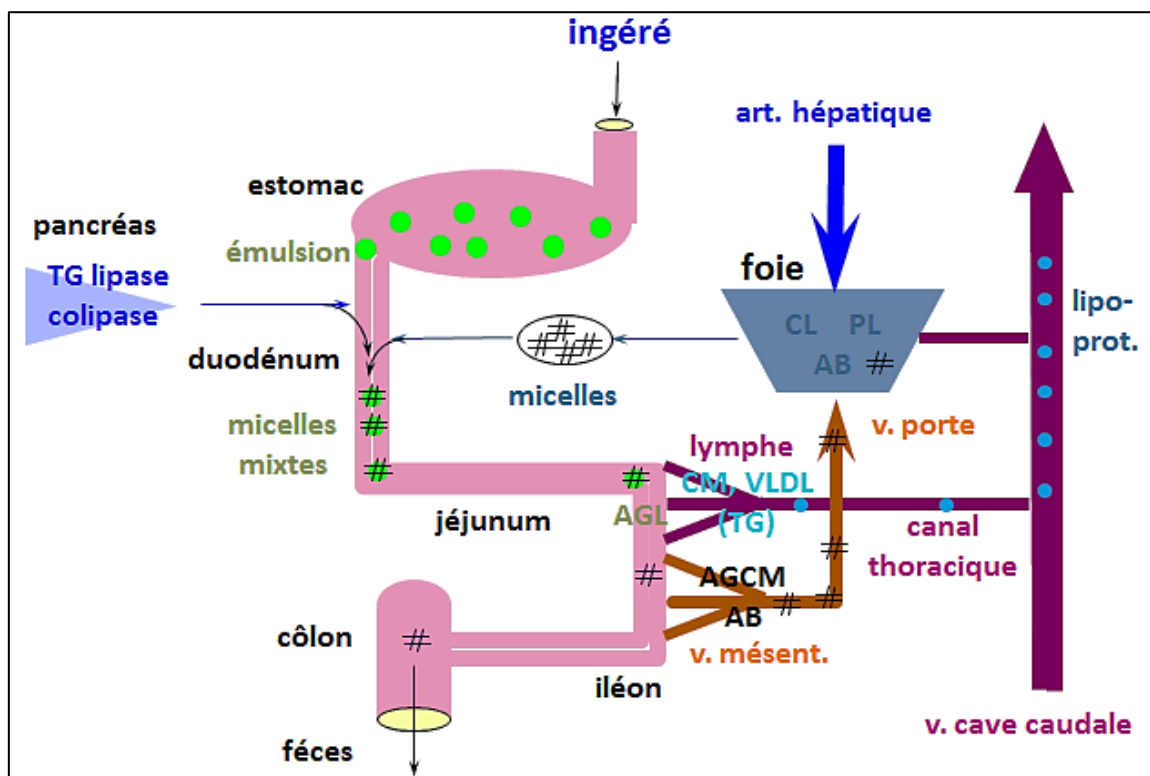


Figure 40: utilisation métabolique des lipides

### III.2.1. Lipides totaux

Une grande partie des lipides est représentée par les triglycérides, le cholestérol, les phospholipides et les acides gras estérifiés. Une partie est liée aux protides (lipoprotéines).

Le rôle nutritionnel des acides gras est double. Certains d'entre eux, les acides gras essentiels (AGE), sont des nutriments indispensables au bon fonctionnement de la cellule animale. Les autres ont uniquement un rôle énergétique.

Le taux des lipides du sang dépend essentiellement de la composition des aliments, il y aurait une augmentation de la teneur des lipides sanguins après l'absorption d'un repas riche en graisses.

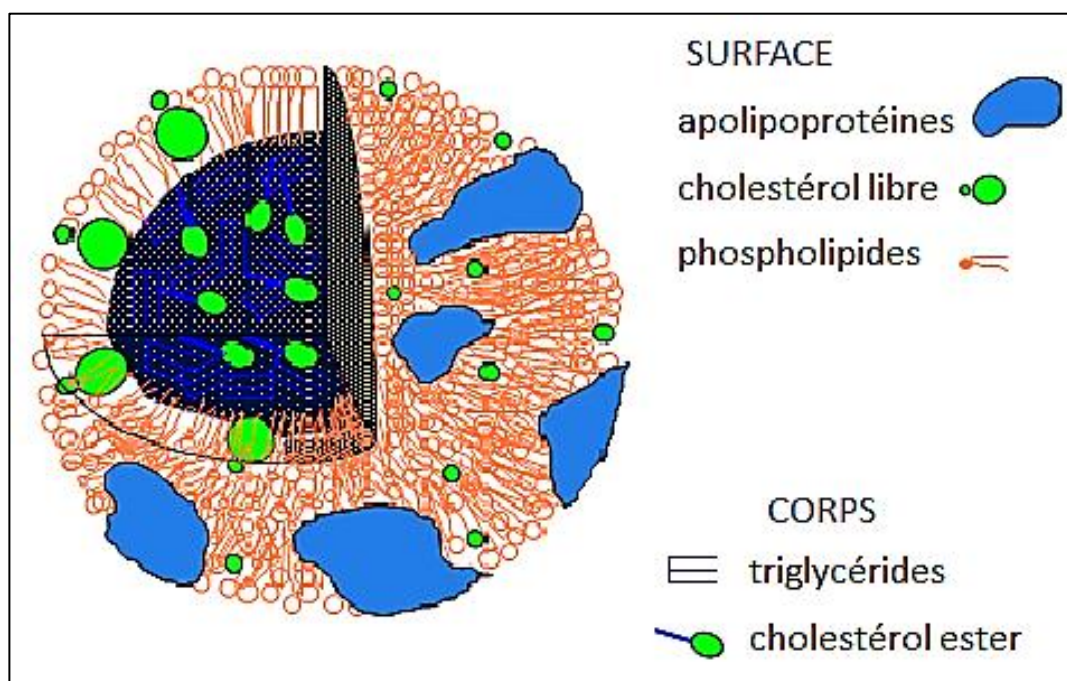


Figure 41 : La structure générale de la lipoprotéine

### III.2.2. Triglycérides

Un triglycéride est une molécule de glycérol sur laquelle sont fixés trois acides gras à longues chaînes qui peuvent être saturés ou insaturés. Les triglycérides proviennent en partie des aliments et sont en partie synthétisés dans le foie. Les triglycérides à longues chaînes représentent la forme principale des lipides de l'alimentation humaine et des animaux supérieurs pour lesquelles ils constituent une importante source d'énergie.

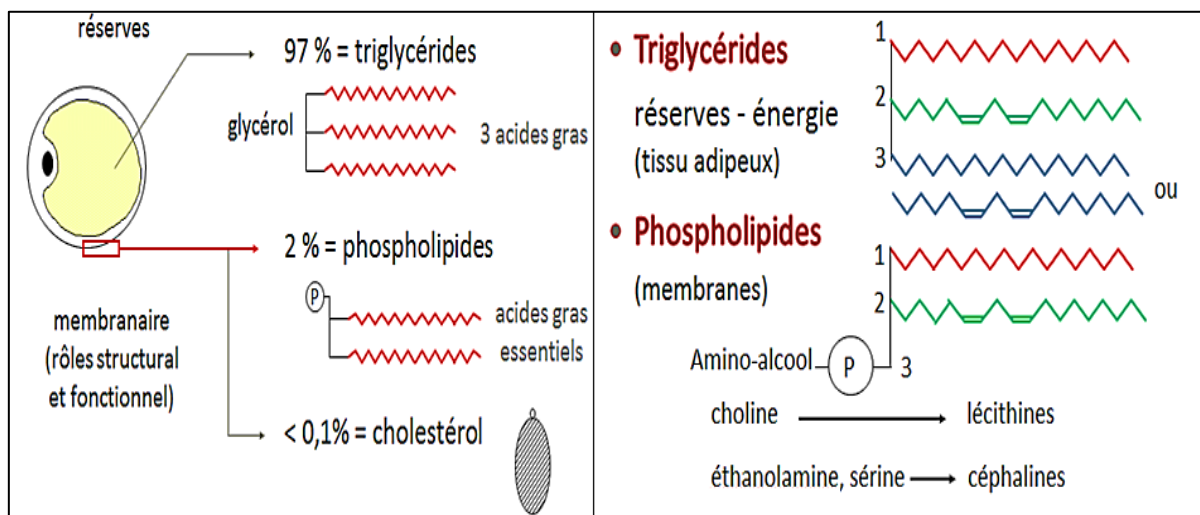
La graisse neutre (triglycérides) est ingérée avec la nourriture (les triglycérides exogènes) ou synthétisée dans le corps, les triglycérides endogènes sont formés dans le tissu adipeux et le foie. Ils sont stockés à l'intérieur des cellules de réserve (les adipocytes) principalement dans



le tissu gras en région mésentérique et sous cutanée formant ainsi l'énergie de réserve et sont mobilisés lors de nécessité.

L'utilisation et la dégradation des triglycérides sont réalisées par un démantèlement des triglycérides en glycérol et en acides gras et ce sont les acides gras qui seront transportés dans le courant sanguin par l'albumine (lipoprotéines). Les réactions d'utilisation ou de synthèse de triglycérides sont catabolisées par des enzymes qui agissent selon le statut hormonal de l'animal.

En cas de sous-alimentation sévère, un des phénomènes essentiels est constitué par la dégénérescence graisseuse du foie : le contenu lipidique total du foie double ; le taux des triglycérides augmente vingt fois ; celui du cholestérol estérifié huit fois et celui des acides gras libres trois fois. Le foie est incapable d'augmenter la sécrétion de lipoprotéines capables de transporter cette graisse en dehors du foie (lipotropie). La surcharge hépatique est un facteur important à considérer pendant la sous-alimentation, mais aussi pendant le rétablissement et la réalimentation.



**Figure 42** : Répartition des lipides

### III.2.3. Cholestérol

Le cholestérol est un stéroïde qui possède un groupe hydroxyle secondaire en position C3. Dans le sang, le cholestérol est toujours lié à une protéine et à une ou plusieurs molécules de phospholipides formant la lipoprotéine. Il se présente sous deux formes estérifiée (70%) et non estérifiée (30%).

Il a une double origine; alimentaire et endogène. Il est surtout synthétisé dans le foie et également dans l'intestin, les surrénales, les testicules, les ovaires, la peau et le système nerveux.



Le cholestérol joue un rôle important dans le métabolisme comme un composant des cellules et des tissus. Une partie du cholestérol endogène est converti en acides biliaires et en hormones stéroïdes, l'autre partie est incorporée dans les membranes cellulaires et le tissu nerveux. Le cholestérol exogène est émulsionné dans l'intestin par les acides biliaires.

Ainsi, une ration alimentaire à base de concentrés entraîne l'augmentation de la cholestérolémie qui peut atteindre 2.39 mmol/l. Cette augmentation semble suivre la même évolution que la lipémie.

L'hypercholestérolémie est rencontrée lors de syndrome néphrotique, hypothyroïdisme, des maladies du foie (cirrhose), lors de corticostéroïdo-thérapie, lors d'hyperlipidémie ou lors d'ictère par rétention.

L'hypocholestérolémie est observée lors du tarissement et en période puerpérale, lors de cachexie et lors d'hyperthyroïdisme.

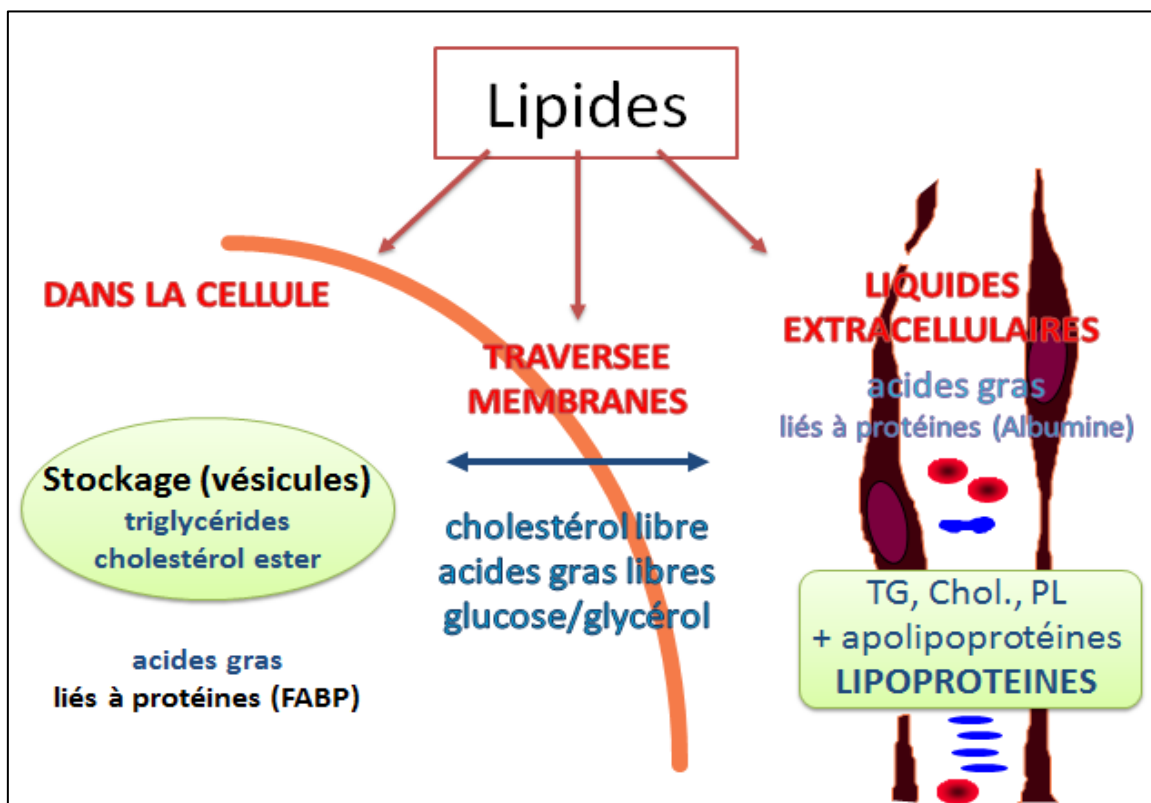


Figure 43 : répartition des lipides

### III.3. Métabolisme des substances azotées

Les animaux non-ruminants ont besoin d'acides aminés préformés dans leur ration. Par contre, grâce aux microbes présents dans le rumen, les ruminants possèdent la capacité de synthétiser les acides aminés à partir d'azote non-protéique (ANP) telles que l'ammoniac ou l'urée qui peuvent donc être utilisés dans leur ration.

#### III.3.1. Protéines totales

Les protéines plasmatiques sont principalement synthétisées dans le foie, les plasmocytes, les ganglions lymphatiques, la rate et dans la moelle épinière. Elles fournissent les acides aminés nécessaires pour le maintien des fonctions vitales, la croissance, la reproduction et la lactation.

Les protéines plasmatiques forment, en fait, un mélange très complexe comprenant non seulement des protéines simples, mais aussi des formes conjuguées telles que les glycoprotéines et différents types de lipoprotéines. Les protéines totales du sérum comprennent l'albumine et les globulines. Le plasma contient du fibrinogène.

La proportion des diverses fractions des protides sériques varie selon l'espèce animale, tandis que chez l'homme, le taux des albumines est plus élevé que celui des globulines, la relation est inverse chez les animaux de la ferme.

La teneur globale en protéines du sérum est en relation avec celle du secteur hydrique. Ainsi, le taux de protéines sériques semble augmenter en cas de déshydratation, ou à l'inverse, diminuer lors d'hyperhydrémie. Il y'a également diminution en cas d'alimentation carencée en protides.

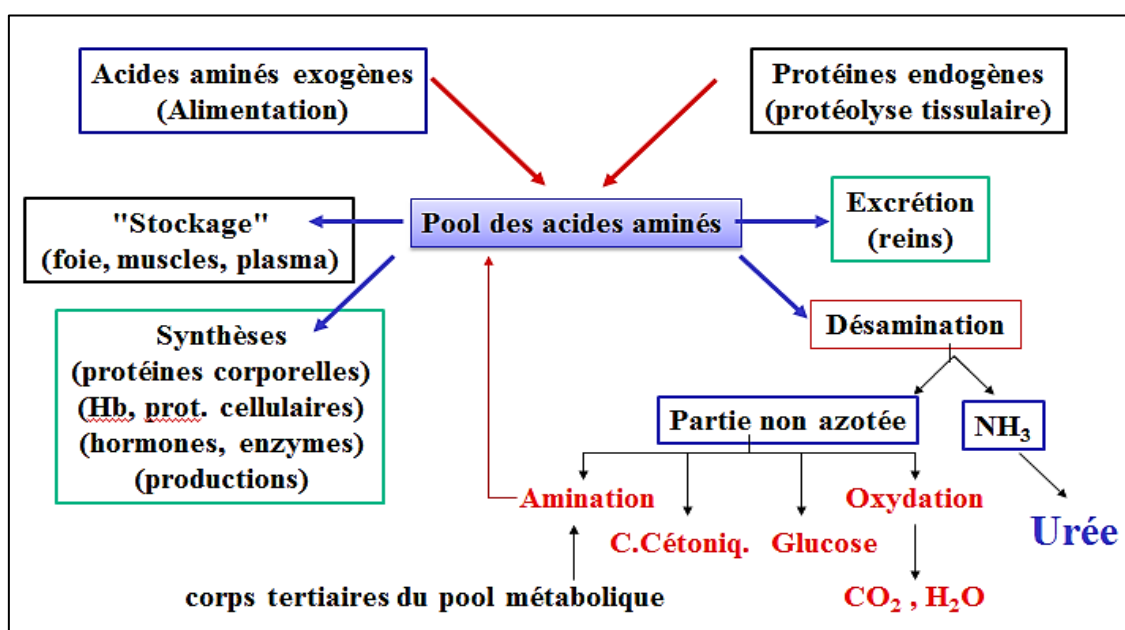


Figure 44. Schéma général du métabolisme azoté dans l'organisme

### **III.3.2. Albumine**

L'albumine est synthétisée dans le foie, elle est formée d'une seule chaîne comportant 610 acides aminés. Elle sert comme molécule de transport pour la bilirubine, les acides gras à longues chaînes, le calcium, les éléments à l'état de traces et plusieurs drogues.

C'est la raison pour laquelle une faible concentration d'albumine dans le sang a une forte répercussion sur la pharmacocinétique. Ce sont les sérum-albumines qui jouent le rôle principal dans le maintien de la pression oncotique du plasma car elles ont un poids moléculaire plus faible que celui des globulines.

La teneur en albumine du sérum diminue chez les vaches laitières à la période du vêlage et ne retrouve sa valeur de départ que progressivement au cours des trois mois suivants (corrélation directe avec la lactation). En revanche, le bilan protidique n'est que très peu influencé par la méthode d'élevage et d'alimentation.

L'hypo albuminémie est rencontrée lors :

- Une insuffisance hépatique chronique,
- Un parasitisme digestif,
- Une sous-alimentation globale surtout protéique
- Une excrétion rénale ou digestive accrue (amyloïdose, entérite chronique).

L'hyper albuminémie est observée lors :

- D'une hypomagnésémie (par diminution des globulines),
- Dans les troupeaux aux pâturages luxuriants avec une forte fertilisation du sol.

Par un phénomène de compensation entre albumine et globulines, les taux des protéines totales, bien que subissent quelques variations, sont beaucoup moins riches en renseignements que le taux d'albumine. Cependant, ce dernier ne peut fournir des précisions sur l'étiologie d'un trouble puisque ; l'alimentation, les phénomènes infectieux, ou le mauvais fonctionnement hépatique peuvent, de la même manière, modifier la valeur de cette constante.

### **III.3.4. Urée**

L'urée est le produit final du métabolisme des protéines dans le corps. Lors du catabolisme protéique ; elles sont dégradées en acides aminés et l'ammoniac formé est transformé en urée dans le foie. L'urée est normalement sécrétée dans les urines.

Cependant, chez les ruminants en cas de déficit azoté, l'urée est recyclée dans le rumen via la salive et, à un moindre degré, via la paroi ruminale où elle est convertie à nouveau en ammoniac et peut servir pour la croissance des bactéries du rumen. Chez les non-ruminants, l'urée produite dans le corps est toujours entièrement perdue dans les urines.

L'urée sanguine est l'indicateur essentiel du taux azoté de la ration et des réserves corporelles.

L'urée sanguine augmente avec :

- L'importance des apports azotés,
- Un catabolisme accru provoqué par le jeûne,
- Par la suite d'une intoxication par l'urée,
- Lors d'addition dans la ration
- Par la suite d'une sous nutrition énergétique.

Par contre un taux faible de l'urée sanguine peut signifier que la ration est riche en amidon, ou encore un faible apport azoté. Il a été noté que l'urée du lait constitue un bon indicateur du rationnement azoté. En revanche, la gestation n'a pas d'effet sur l'urémie, mais elle augmente au cours du premier mois de lactation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **ARABA A (2006)**. Cours d'Alimentation des animaux domestiques. 1ère Année du Cycle Ingénieur et de 3ème Vétérinaire. Département de Productions et de Biotechnologies Animales. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.
2. **ARAB H., HADDI M.L., MEHENNAOUI S. (2009)**. Evaluation de la valeur nutritive par la composition chimique des principaux fourrages des zones aride et semi-aride en Algérie. *Revue Sciences & Technologie C – N°30*, pp50-58.
3. **BOCQUIER F., THERIEZ M., PRACHE S., BRELURUT A. (1988)**. In: Alimentation des bovins, ovins et caprins (R. Jarrige, ed.) I.N RA publications. Paris. p. 249-280.
4. **DROGOUL C., GADOUD R., JOSEPH M.M., JUSSIAU R., LISBERNEY M.J., MANGEOL B., MONTMÉAS L., TARRIT A. (2004)**. Alimentation minérale. Nutrition et alimentation des animaux d'élevage tome 1. Educagri édition. p199- 216.
5. **DROGOUL C., GADOUD R., JOSEPH M.M., JUSSIAU R., LISBERNEY M.J., MANGEOL B., MONTMÉAS L., TARRIT. A. (2004a)**. Alimentation des ovins. Nutrition et alimentation des animaux d'élevage Tome 2. Educagri édition. p 241-277.
6. **GADOUD R., JOSEPH M.M., JUSSIAU R., LISBERNEY M.J. MANGEOL B., MONTMÉAS L., TARRIT A. (1992)**. Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 2, les éditions Foucher, Paris, p: 191-211.
7. **INRA (1995)**. Nutrition des ruminants domestiques – Ingestion et digestion. Collection mieux comprendre. INRA édition – France .p511.
8. **INRA (2010)**. Alimentation des bovins, ovins et caprins : Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables Inra 2007. Mise à jour 2010. Éditions Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra. Quæ Éd., 2010. Paris. France .p315.
9. **INSTITUT DE L'ELEVAGE. (2010)**. Guide pratique de l'alimentation du troupeau laitier. Institut de l'Élevage, Collection les Incontournables,
10. **ITEB-INRAP (1984)**. Alimentation des bovins. Ed. ITEB –Paris. p160.
11. **JARRIGE R. (1988)**. Alimentation des bovins, ovins et des caprins. Edition INRA – France, p 476.
12. **JARRIGE R. (1995)**. Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion. Édition INRA. p133.
13. **KAMOUN M. (2008)**. Recueil de méthode d'analyses et de mesures utilisées en alimentation animale. Ecole Nationale de Médecine Vétérinaire de Sidi-Thabet. Centre de Publication Universitaire. P103.
14. **KOLB E. (1975)**. Physiologie des animaux domestiques. Vigot frères éditions-Paris. 974p.
15. **LEMNOUAR- HADDADI N.F.Z. (2001)**. Cours d'Alimentation des ruminants. 2ème année Docteur vétérinaire. Institut des sciences vétérinaire Université de Constantine.

- 16. MARX D. J. (2002).** Les maladies métaboliques chez les ovins. Thèse Doctorat Vétérinaire, -ENV d'Alfort, 140p.
- 17. SAUVANT D. (1988).** La composition et l'analyse des aliments. In : Jarrige R.(ed), Alimentation des Bovins, Ovins et Caprins. INRA, Paris. 305-314.
- 18. SAUVANT D. (2005).** Polycopié de cours: Principes généraux de l'alimentation animale. partement des sciences animales. Institut national agronomique Paris-Grignon.
- 19. SOLTNER D. (1994).** Alimentation des animaux domestiques (tomes 1 et 2). Collection Sciences et Techniques Agricoles, 20ème édition.
- 20. SOLTNER D. (1999).** Alimentation des animaux domestiques. Tome 1: Les principes de l'alimentation pour toutes les espèces. Ed. Sciences et techniques agricoles, Saint – Gemmes-sur-Loire. pp129.
- 21. SOLTNER D. (2008).** Alimentation des animaux domestiques Tome 1 Les principes de l'alimentation pour toutes les espèces. Ed. Sciences et techniques agricoles (22ème édition).
- 22. WOLTER R. (1992).** Alimentation de la vache laitière. Editions France agricole, p 223.