

Livret de l'agriculture

L'ALIMENTATION DE LA VACHE LAITIERE

Physiologie et Besoins

Christine CUVELIER*, Jean-Luc HORNICK*, Yves BECKERS*, Eric FROIDMONT**, Emilie
KNAPP*, Louis ISTASSE*, Isabelle DUFRASNE*

*Université de Liège

**Centre Wallon de Recherches Agronomiques

Les auteurs remercient les membres du comité de lecture :

Messieurs

Jean-Pierre Destain, Centre Wallon de Recherches Agronomiques

David Knoden, Fourrages Mieux ASBL

Pierre Luxen, Agra-Ost ASBL

Marc Thirion, Service Public de Wallonie (SPW), Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGARNE), Département de la Ruralité et des Cours d'eau

Dimitri Wouez, Nitrawal ASBL

PREFACE

L'univers de la production laitière n'a cessé d'évoluer depuis ces 60 dernières années. Ces changements nécessitent de la part des éleveurs une mise à jour continue de leurs connaissances et de leur façon de gérer leur exploitation.

A l'heure actuelle, les éleveurs laitiers sont confrontés à des défis majeurs : assurer la sécurité d'approvisionnement en lait, produire un lait de qualité, respecter l'environnement et le bien-être animal, tout en dégagant une marge bénéficiaire leur permettant de vivre.

Le Service Public de Wallonie souhaite aider les éleveurs, en leur donnant des outils qui leur permettront de faire face à ces nouveaux enjeux et de s'inscrire dans une démarche proactive de gestion de leur troupeau. Ce nouveau Livret de l'Agriculture, dédié à l'alimentation de la vache laitière, illustre cette volonté. Il doit être considéré comme un outil de formation des éleveurs, un véritable guide pratique, s'adressant tant aux novices qu'aux éleveurs plus expérimentés. Il sera divisé en plusieurs tomes. Ce 1^{er} livret est consacré à jeter les bases nécessaires à la compréhension du rationnement pratique : il aborde donc la physiologie de la vache laitière et l'expression de ses besoins. Un 2^{ème} livret paraîtra prochainement, et sera quant à lui dédié au rationnement pratique : aliments utilisés en production laitière, influence de l'alimentation sur la composition du lait, etc.

Face à un contexte économique instable et à des pressions environnementales de plus en plus présentes, l'alimentation de la vache laitière en région wallonne ne peut que se concevoir à travers une optique de durabilité et une stratégie de valorisation de nos ressources propres. Aussi, le fil conducteur de ce livret est l'utilisation, la valorisation et l'optimisation de l'herbe et des pâturages en élevage laitier. Tout éleveur soucieux d'améliorer sa gestion de l'herbe et/ou de s'orienter davantage vers une autonomie alimentaire, trouvera dans ce livret les réponses aux questions qu'il se pose.

Ce livret est le fruit d'un travail concerté entre différents acteurs actifs dans le domaine de l'alimentation de la vache laitière :

- Yves BECKERS, du Département des Sciences agronomiques de Gembloux Agro-Bio Tech-Université de Liège
- Christine CUVELIER, l'auteur, du Service de Nutrition des Animaux domestiques de la Faculté de Médecine vétérinaire de l'Université de Liège ;
- Jean-Pierre DESTAIN, du Centre Wallon de Recherches Agronomiques
- Isabelle DUFRASNE, du Service de Nutrition des Animaux domestiques de la Faculté de Médecine vétérinaire de l'Université de Liège ;
- Eric FROIDMONT, du Département 'Productions et Filières' du Centre Wallon de Recherches Agronomiques
- Jean-Luc HORNICK, du Service de Nutrition des Animaux domestiques de la Faculté de Médecine vétérinaire de l'Université de Liège ;
- Louis ISTASSE, du Service de Nutrition des Animaux domestiques de la Faculté de Médecine vétérinaire de l'Université de Liège ;
- Emilie KNAPP, du Service de Nutrition des Animaux domestiques de la Faculté de Médecine vétérinaire de l'Université de Liège ;

- David KNODEN, de l'ASBL Fourrages Mieux ;
- Pierre LUXEN, de l'ASBL Agra-Ost ;
- Marc THIRION, du Département de la Ruralité et des Cours d'eau de la Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGARNE) du Service public de Wallonie (SPW) ;
- Dimitri WOUEZ, de l'ASBL Nitrawal

Je me réjouis de cette collaboration fructueuse, qui va se poursuivre avec l'élaboration d'un second Livret de l'Agriculture, dédié au rationnement pratique en élevage laitier.

Je vous souhaite une bonne lecture.

TABLE DES MATIERES

PREFACE	4
TABLE DES MATIERES	6
LISTE DES ABBREVIATIONS	8
INTRODUCTION	9
PARTIE I : LA COMPOSITION DES ALIMENTS	9
I.1 La matière organique	10
<i>I.1.1 Les glucides et la lignine</i>	10
<i>I.1.2 Les lipides</i>	11
<i>I.1.3 Les matières azotées</i>	12
<i>I.1.4 Les vitamines</i>	12
I.2 La matière minérale	12
En bref	13
PARTIE II : LA DIGESTION DES ALIMENTS CHEZ LE RUMINANT	13
II.1 Anatomie et physiologie digestive des ruminants	13
II.1.1 L'anatomie du tube digestif des ruminants.....	13
II.1.2 Le fonctionnement du rumen : l'écosystème ruminal	19
II.2 La digestion des aliments	21
II.2.1 La digestion des glucides	22
II.2.2 La digestion des lipides.....	25
II.2.3 La digestion des matières azotées.....	26
II.2.4 La digestion des minéraux.....	28
II.3 La digestibilité des aliments	29
II.3.1 Définitions	29
II.3.2 La digestibilité des aliments	29
En bref	31
PARTIE III : LES PARTICULARITES DU METABOLISME DES GLUCIDES, DES AGV, DES LIPIDES ET DES PROTEINES CHEZ LA VACHE LAITIERE EN LACTATION	31
III.1 Métabolisme des glucides	32
III.2 Métabolisme des AGV	33
III.3 Métabolisme des lipides.....	33
III.4 Métabolisme des protéines.....	34
En bref	34

PARTIE IV : EXPRESSION DES BESOINS DES ANIMAUX ET DES APPORTS DE LA RATION.....	35
IV. 1 Les systèmes utilisés pour exprimer les besoins des animaux et les apports de la ration	35
IV.1.1 Expression des besoins et des apports en MS	35
IV.1.2 Expression des besoins et des apports en énergie	39
IV.1.3 Expression des besoins et des apports en matières azotées	41
IV.1.4 Expression des besoins et des apports en minéraux et en vitamines	48
IV.1.5 Expression des besoins et des apports en eau.....	50
IV. 2 Les besoins des animaux	51
IV.2.1 Besoins d'entretien et besoins de production	51
IV.2.2 Des besoins aux apports alimentaires	57
En bref	63
REFERENCES	65
LIENS UTILES.....	67

LISTE DES ABBREVIATIONS

AA : Acide aminé

ADF : Acid Detergent Fiber

AGV : Acide Gras Volatil

DVE : *Darmverteerbaar Eiwit*

EB : Energie Brute

ED : Energie Digestible

EM : Energie Métabolisable

EN : Energie Nette

NDF : Neutral Detergent Fiber

NEL : Energie Nette Lait

MS : Matière Sèche

OEB : *Onbestendige Eiwit balans*

INTRODUCTION

L'alimentation a pour objectif de fournir les éléments nutritifs permettant de satisfaire l'ensemble des besoins. Pour une vache laitière, ces besoins sont représentés par les besoins d'entretien, de production, de gestation et le cas échéant de croissance s'il s'agit d'une primipare. La couverture de ces besoins permet d'obtenir une production optimale si elle est réalisée en respectant la physiologie générale du ruminant et particulièrement celle de la vache en lactation. Grâce à la présence d'une population microbienne variée au sein du rumen, les ruminants peuvent valoriser des aliments riches en fibres, tels les fourrages, que d'autres animaux comme les monogastriques ne peuvent digérer. Ils sont donc à même de valoriser la prairie dans le cadre de leur alimentation. Les développements de la recherche de ces dernières années ont permis de mieux connaître l'activité microbienne dans le rumen, et, de ce fait, d'orienter les fermentations vers la formation de produits intéressants pour la vache laitière. Par ailleurs, les rejets azotés de l'animal dans l'environnement font actuellement l'objet d'une attention croissante, les éleveurs étant invités à mettre en place des stratégies visant à les réduire.

Ce livret a précisément pour but de jeter les bases de l'alimentation de la vache laitière. Il présente ainsi brièvement l'anatomie digestive de la vache et les processus impliqués au cours de la digestion, et explicite les notions de besoins alimentaires. Rédigé dans un langage accessible à tous et toutes, il fournira à tout éleveur les outils pour comprendre les mécanismes et les principes qui sous-tendent le rationnement des troupeaux laitiers.

PARTIE I : LA COMPOSITION DES ALIMENTS

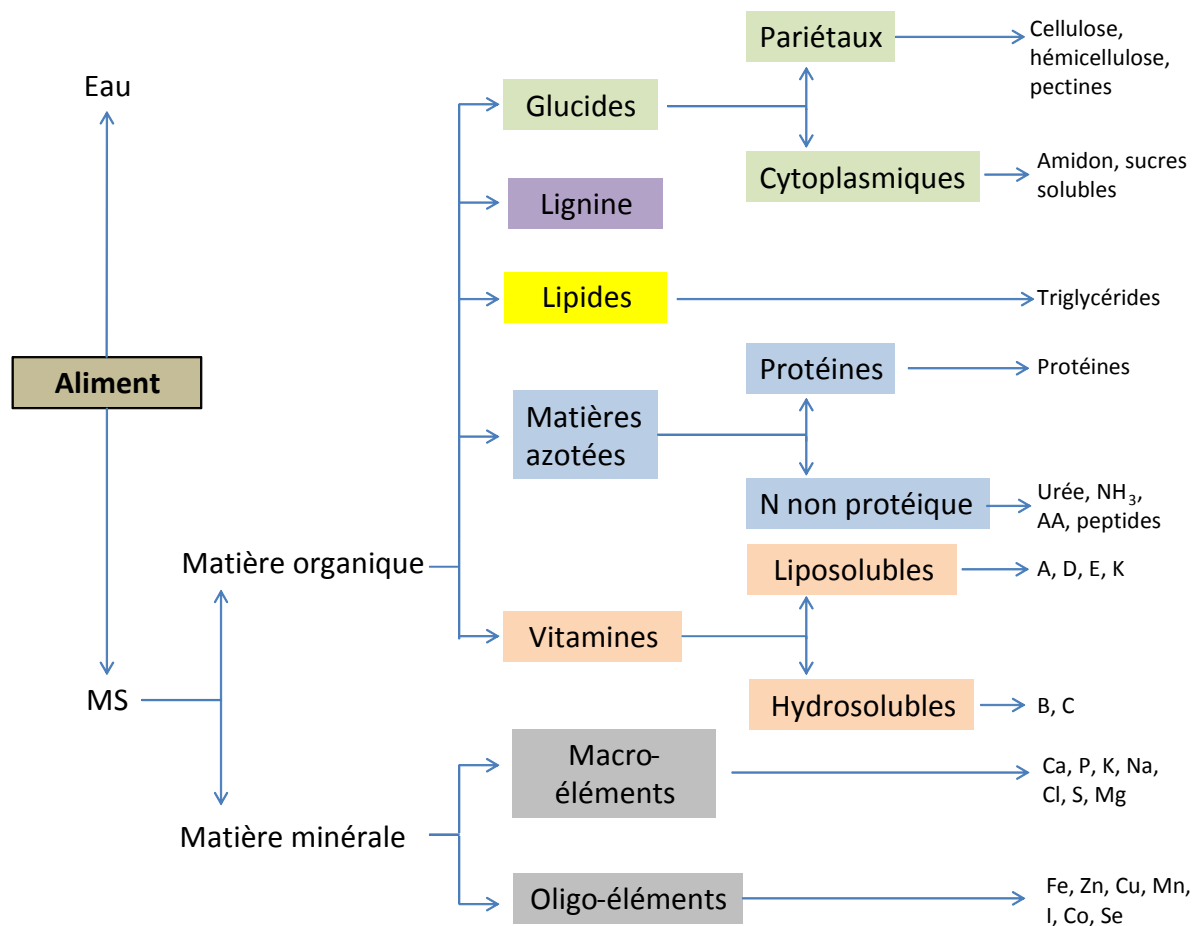
Les aliments distribués aux bovins sont composés d'eau et de divers nutriments¹ : des glucides, des lipides, des matières azotées, des vitamines et des minéraux, ainsi que des substances totalement dépourvues de valeur nutritive, telle que la lignine.

Lorsqu'on place un aliment dans une étuve, l'eau contenue dans l'aliment s'évapore et il subsiste un résidu sec, appelé matière sèche (MS). Tous les aliments contiennent une certaine fraction de MS. Ainsi, la teneur en MS de l'herbe varie aux alentours de 20 %, alors que celle du foin et des céréales se situe plutôt respectivement aux environs de 85 et 90 %.

La MS comprend d'une part la matière organique, caractérisée par la présence d'atomes de carbone, et d'autre part la matière minérale. Les composants de la matière organique sont les glucides, la lignine, les lipides, les matières azotées et les vitamines. La matière minérale comprend quant à elle les minéraux (figure 1).

Figure 1 : Composition des aliments (à partir de Brocard et al 2010)

¹ Nutriment : substance chimique contenue telle quelle dans les aliments ou provenant de leur digestion, et que les cellules utilisent directement dans leur métabolisme



I.1 La matière organique

I.1.1 Les glucides et la lignine

On utilise fréquemment le terme *sucres* pour désigner les glucides. Il s'agit d'une dénomination quelque peu erronée, le terme *sucres* désignant en réalité une catégorie bien précise de glucides, les sucres solubles. Aussi, dans ce livret, nous utiliserons le terme correct pour désigner cette catégorie de nutriments, et nous parlerons de *glucides*.

On peut distinguer schématiquement 2 catégories de glucides (figure 1) :

- Les glucides constituant la paroi des cellules végétales, les *glucides pariétaux* (appelé communément « les fibres »), qui comprennent la cellulose, l'hémicellulose et les pectines ;
- Les glucides contenus à l'intérieur des cellules végétales, les *glucides cytoplasmiques*, qui comprennent l'amidon et les sucres solubles (glucose, lactose,...).

La paroi des cellules végétales comprend également un composé non glucidique, la lignine (figure 1). Cette substance, qui s'associe aux glucides pariétaux et dont la teneur augmente avec l'âge de la plante, est presque totalement non dégradable dans le tube digestif du ruminant.

Lorsqu'une analyse de fourrage est réalisée auprès d'un laboratoire, les résultats relatifs aux teneurs en glucides précisent en général d'une part la teneur en « cellulose brute » par « la

méthode de Weende », et d'autre part les teneurs en fibres « NDF » (*Neutral Detergent Fiber*) et en fibres « ADF » (*Acid Detergent Fiber*), en lignine et en hémicellulose (figure 2).

Figure 2 : Extrait d'une analyse de fourrage (Herbe à pâturer)

NATURE : Herbe prairie fraîche à pâturer		N° Identification	
Origines : Indéterminée	Type de Prairie :	Coupe :	Préfanage :
Matériel de récolte :	Produit(s) de conservation :		non précisé
Mode de conservation : Non précisé			
Date(s) de coupe : __/__/__ et __/__/__	Date(s) de récolte : __/__/__ et __/__/__		
	Votre ECHANTILLON	sur MATIERE SECHE	MOYENNES
Poids frais de l'échantillon (g)	191		
Matière sèche (g/kg)	178	1000	
CONSERVATION			
pH			
Azote ammoniacal (%)			
VALEUR ALIMENTAIRE (g/kg)			
Cendres brutes	20	115	
Mat. azotées tot. (Kjeldahl, NIR)	34	188	
Cellulose brute (Weende, NIR)	40	224	
NDF (cellulose + hémicellulose + lignine NIR)		471	
ADF (Nir)		264	
Lignine (Nir)		28	
Hémicellulose (Nir estimation)		207	

Contrairement à ce que sa dénomination évoque, l'analyse de la cellulose brute par la méthode de Weende ne dose pas fidèlement la cellulose. Cette méthode extrait un résidu organique composé majoritairement de cellulose et de lignine et contenant une partie de l'hémicellulose. Les teneurs en NDF, ADF, lignine et hémicellulose sont quant à elles déterminées par une autre méthode d'analyse, la méthode Van Soest. Schématiquement, retenons que la teneur en NDF représente la teneur en hémicellulose, cellulose et lignine, et que la teneur en ADF représente la teneur en cellulose et en lignine.

1.1.2 Les lipides

Les lipides sont également appelés *matières grasses*. Il existe différentes classes de lipides. Les principaux constituants lipidiques des végétaux sont en général des triglycérides, c'est-à-dire des molécules comprenant 1 glycérol + 3 acides gras².

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

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

² Les acides gras sont des acides carboxyliques à chaîne aliphatique hydrophobe, saturés ou non saturés selon qu'ils ne contiennent pas ou contiennent des doubles liaisons. Il existe de nombreux acides gras différents, qui se différencient par la longueur de leur chaîne carbonée, mais aussi par le nombre, la position et la configuration spatiale des doubles liaisons.

On peut également les classer en fonction de la présence ou de l'absence de double liaison sur leur chaîne carbonée : les acides gras saturés d'une part (sans double liaison) et les acides gras insaturés d'autre part (avec 1 double liaison ou plus).

Notons encore que certains acides gras sont considérés comme « essentiels » pour toutes les espèces animales. Ceci signifie qu'ils doivent impérativement être apportés par l'alimentation car l'animal ne peut les synthétiser. Ils peuvent par contre être synthétisés par les microorganismes hébergés dans leur tube digestif. Ainsi chez les ruminants, cette synthèse s'opérant dans le rumen, il n'est pas indispensable d'apporter ces acides gras dans leur alimentation.

1.1.3 Les matières azotées

Les matières azotées sont représentées par des protéines et de l'azote non protéique.

Une protéine est constituée d'une longue chaîne d'acides aminés (AA). En alimentation, 20 AA différents sont pris en considération, dont pratiquement la moitié d'entre eux sont considérés comme essentiels car ne pouvant être synthétisés par l'animal. Ils doivent donc être impérativement présents dans les aliments consommés.

A nouveau le ruminant se distingue des autres espèces animales car une part substantielle des acides aminés digérés dans l'intestin a été synthétisée dans le rumen grâce aux microorganismes hébergés. Nonobstant, des AA, tel que la méthionine et la lysine, sont cependant considérés comme « limitants » : leur synthèse *via* les microorganismes du rumen ne couvre pas toujours les besoins de la vache en production.

L'azote non protéique comprend quant à lui notamment les peptides (chaînes d'AA limitées), les AA, l'urée et l'ammoniac (NH_3) (figure 1).

1.1.4 Les vitamines

Les vitamines se définissent comme des constituants de la matière organique que l'animal est en général incapable de synthétiser, et qui, à faible dose, sont indispensables au développement, à l'entretien et aux fonctions de l'organisme. On distingue 2 catégories de vitamines (figure 1) :

- Les vitamines liposolubles, c'est-à-dire solubles dans les graisses : vitamines A, D, E et K
- Les vitamines hydrosolubles, c'est-à-dire solubles dans l'eau : vitamine C et vitamines du groupe B (B1 : thiamine ; B2 : riboflavine ; B3 : niacine ; B5 ; B6 ; B8 : biotine ; B9 : acide folique ; B12).

Les vitamines liposolubles font l'objet d'un stockage au niveau du foie. Même s'il y a mise en réserve, il est certain qu'un apport régulier par l'alimentation permet à l'animal d'extérioriser son potentiel de production. Chez le ruminant, il n'est pas nécessaire d'apporter *via* la ration alimentaire les vitamines du groupe B ainsi que les vitamines C et K. Les microorganismes du rumen sont en effet capables de les synthétiser. Les autres vitamines doivent par contre impérativement être apportées par les aliments distribués.

1.2 La matière minérale

La matière minérale, ou matière inorganique, correspond au résidu sec d'un aliment lorsque celui-ci a été calciné dans un four à 550°C. Ce résidu est également appelé *endre brutes* ou

cendres totales. Celles-ci comprennent les minéraux, que l'on peut diviser en 2 catégories (figure 1) :

- Les macro-éléments, présents en quantités relativement importantes et pour lesquels l'unité de mesure est le g. Ce sont ainsi le calcium (Ca), le phosphore (P), le potassium (K), le sodium (Na), le chlore (Cl), le soufre (S) et le magnésium (Mg).
- Les oligo-éléments, présents en quantités très faibles ou à l'état de traces, pour lesquels l'unité de mesure est le mg. Ce sont le fer (Fe), le sélénium, (Se), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), l'iode (I), le cobalt (Co) et le manganèse (Mn).

En bref

Lorsqu'on place un aliment dans une étuve, l'eau contenue dans l'aliment s'évapore et il subsiste un résidu sec, appelé matière sèche.

La MS comprend d'une part la matière organique et d'autre part la matière minérale. Les composants de la matière organique sont les glucides (pariétaux et cytoplasmiques), la lignine, indigestible dans l'intestin du ruminant, les lipides, les matières azotées et les vitamines (liposolubles et hydrosolubles). La matière minérale comprend quant à elle les minéraux (macro-éléments et oligo-éléments).

PARTIE II : LA DIGESTION DES ALIMENTS CHEZ LE RUMINANT

II.1 Anatomie et physiologie digestive des ruminants

II.1.1 L'anatomie du tube digestif des ruminants

D'un point de vue anatomique, le système digestif des bovins se compose de la bouche, de la langue, des dents, du pharynx digestif, de l'œsophage, des estomacs, des intestins, du rectum et de l'anus. Les estomacs se composent du réseau, du rumen, du feuillet et de la caillette. Ils sont particulièrement adaptés à la digestion d'aliments riches en fibres, tels que les fourrages. Le rôle de la digestion est d'extraire les nutriments contenu dans les aliments pour les rendre absorbables par le tube digestif et disponibles pour le métabolisme des cellules animales. La digestion combine des mécanismes physiques et chimiques.

Bouche et œsophage

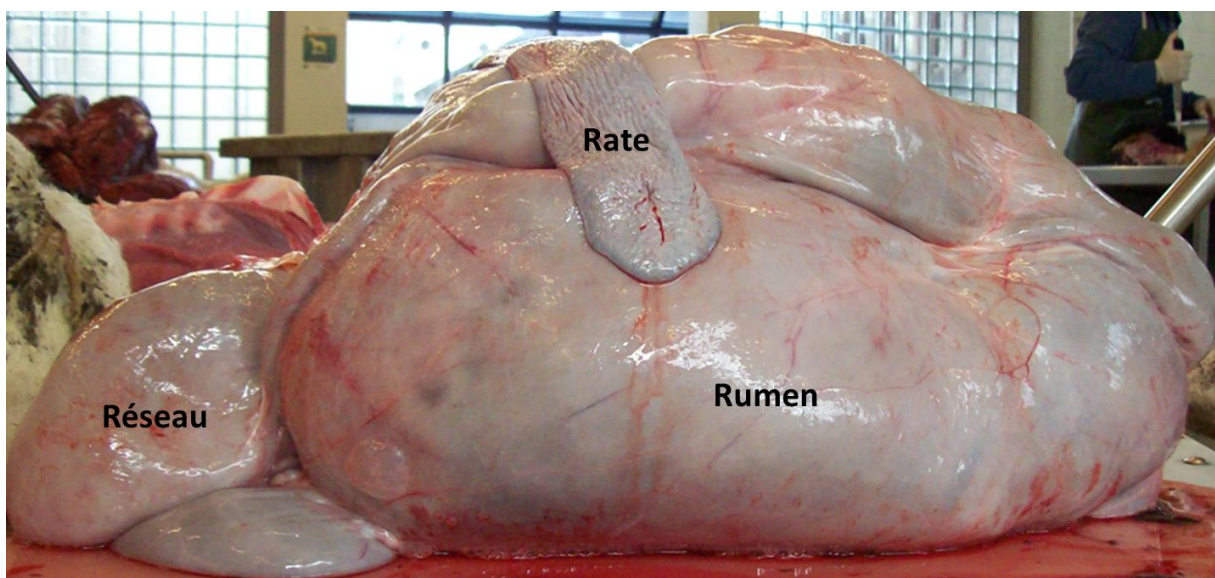
Les bovins n'ont ni canine ni incisive à la mâchoire supérieure. Ils possèdent cependant à la place un « bourrelet gingival ». Ils ont une langue épaisse et rugueuse qui permet une préhension optimale de l'herbe qui est pincée entre les incisives inférieures et le bourrelet gingival et ensuite arrachée du pré. Des glandes salivaires volumineuses aident à imprégner le bolus. La salive, contenant des bicarbonates et des phosphates, possède un rôle tampon, d'imbibition des aliments, et de lubrification. La production de salive peut atteindre 150 litres par jour chez une vache laitière. Elle dépend de la mastication, elle-même liée à la fibrosité de la ration. On distingue la mastication liée à l'ingestion (30 à 95 mouvements par minute) et la

mastication mérycique³, liée à la rumination (55 mouvements par minute). Au total, cela fait 40.000 mouvements par jour !

Estomac

Les estomacs des ruminants est volumineux, au point d'occuper les 4/5 de la cavité abdominale. Ils comprennent trois compartiments, appelés également « préestomacs », le réseau (ou *réticulum*), le rumen, et le feuillet (ou *omasum*). Ceux-ci précèdent un 4^{ème} compartiment, la caillette (ou *abomasum*), qui correspond à l'estomac proprement dit. Cette configuration particulière permet au ruminant d'effectuer une prédigestion microbienne des aliments, avec une utilisation particulièrement poussée des fibres présentes dans la ration.

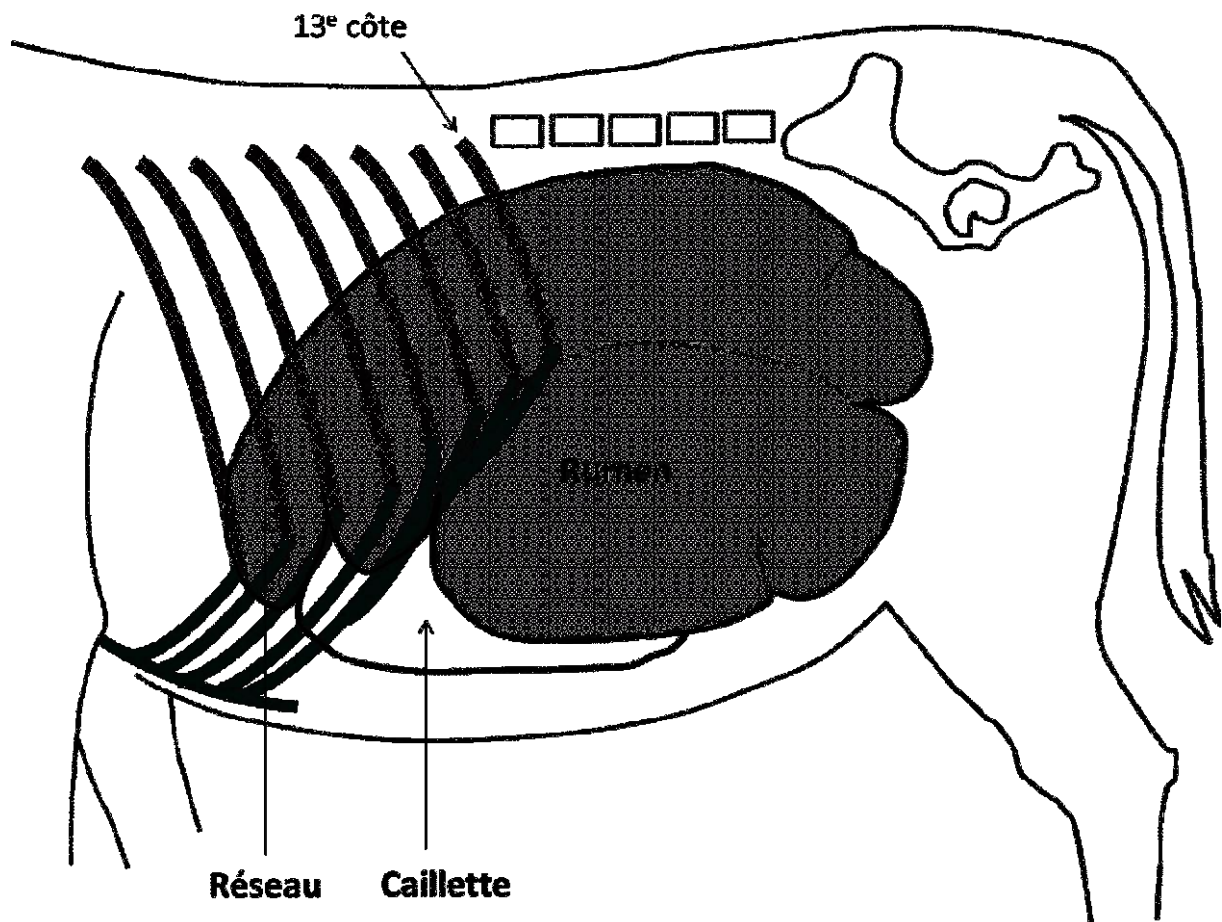
Figure 3 : Rumen et réseau (photo : Dr. A Gabriel, FMV, ULg)



Réseau et rumen. Le réseau et le rumen (figure 3) sont souvent considérés ensemble car leur contenu se mélange fréquemment. Le rumen a une capacité d'environ 150 litres et représente 80 % du volume total des estomacs. Sa paroi interne est constituée de papilles qui augmentent la surface de contact avec la masse alimentaire et qui permettent l'absorption de certains nutriments. Le rumen est situé sur le côté gauche de l'animal et s'étend du diaphragme au bassin (figure 4). Il communique de façon large avec le réseau.

Figure 4 : Schéma de l'abdomen de la vache, côté gauche

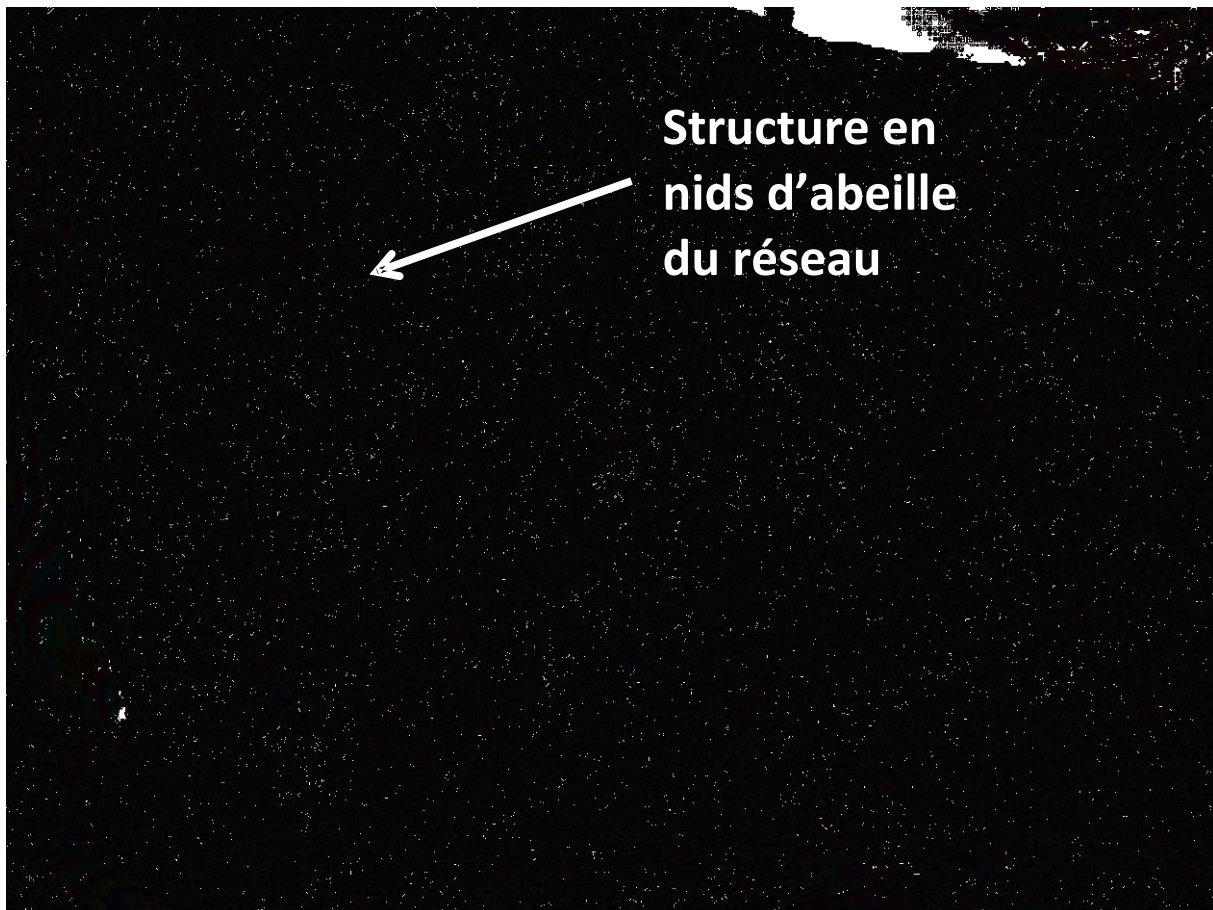
³ Mastication mérycique : les aliments sont ramenés dans la bouche, mastiqués et imprégnés de salive une deuxième fois.



Le réseau est quant à lui un petit réservoir situé entre le rumen et le diaphragme (figure 3), dont la paroi présente une apparence réticulaire en nids d'abeilles tout à fait caractéristique (figure 5). Sur la paroi droite et dorsale du réseau, cette structure fait place à un sillon relativement large et profond, appelé gouttière œsophagienne, qui s'étend du cardia⁴ jusqu'à l'orifice de communication entre le réseau et le feuillet — l'orifice réticulo-omasal.

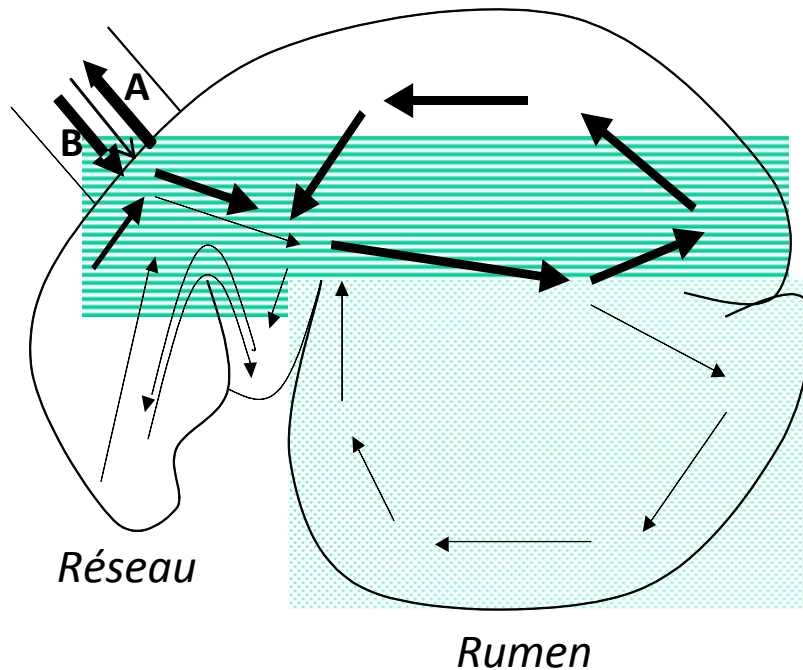
Figure 5 : La paroi interne du réseau et sa structure en nids d'abeille (photo : Dr. A Gabriel, FMV, ULg)

⁴ Cardia : orifice de communication entre l'œsophage et l'estomac



Le rumen-réseau assure l'essentiel de la prédigestion que subissent les aliments avant d'atteindre la caillette. La masse alimentaire subit en effet à ce niveau d'une part un brassage permanent via la motricité du rumen-réseau, d'autre part les fermentations microbiennes, et enfin, un broyage poussé via la rumination. La rumination consiste en effet en la régurgitation du bol alimentaire vers la bouche et sa mastication. Elle permet donc une réduction de la taille des particules et une bonne imprégnation du bol alimentaire avec la salive, ce qui a pour effet d'augmenter la densité des particules. Le réseau peut être considéré comme un véritable carrefour qui régule la circulation des particules alimentaires entre l'œsophage, le rumen et le feuillet. Ainsi, les particules suffisamment petites, de l'ordre de quelques millimètres, passent à travers l'orifice réticulo-omasal pour atteindre le feuillet, tandis que les particules de grande taille sont refoulées vers le réseau et le rumen, ce qui a pour effet de stimuler la rumination et la production de salive. Notons que l'orifice réticulo-omasal se trouvant en position basse, seules les particules ayant acquis une densité suffisante pour couler, et non plus flotter dans le rumen, passent à travers celui-ci. La rumination permet donc la vidange du rumen-réseau par la réduction en petites particules des végétaux les plus résistants à la mastication.

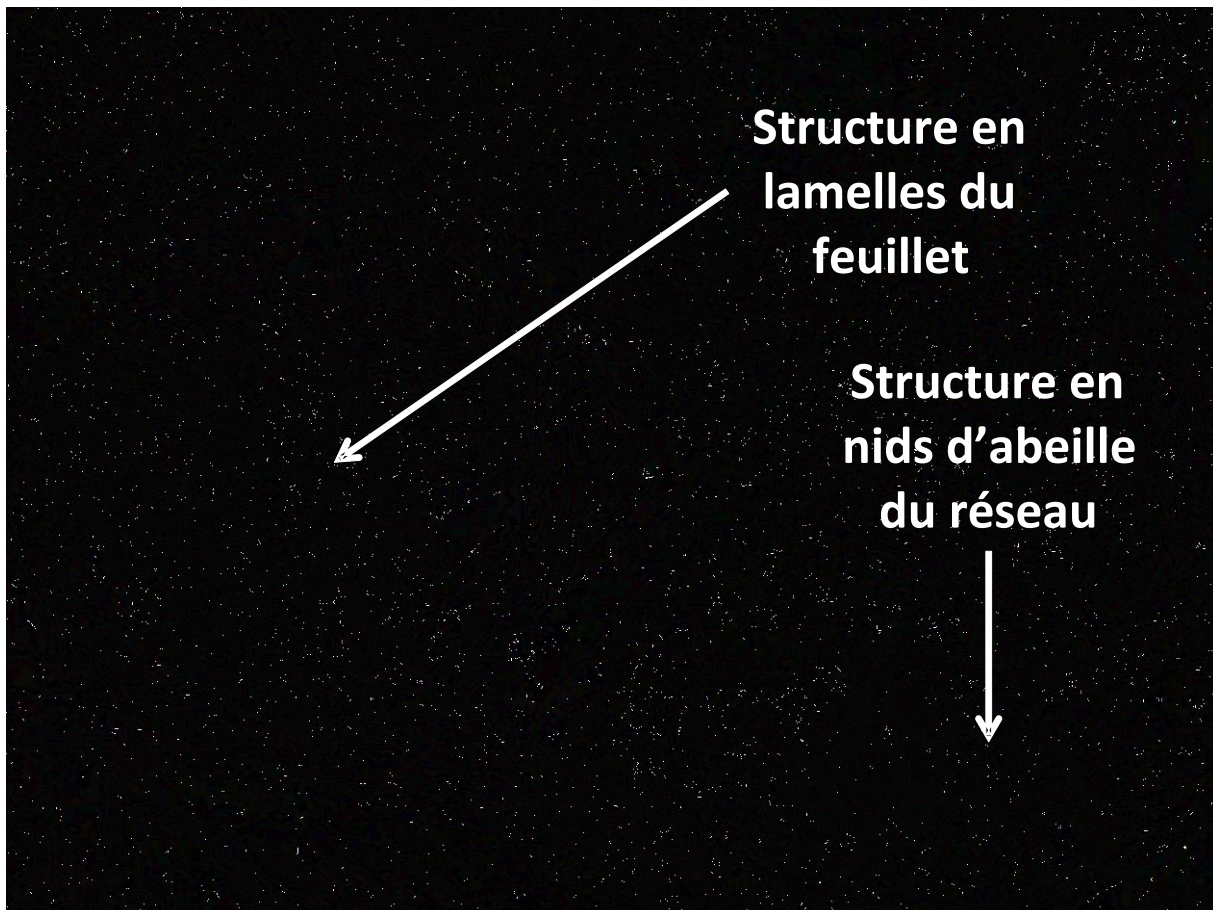
La rumination



Dans le rumen, on distingue des mouvements de brassage permanents au nombre de 2 par minutes (flèches fines). D'autres mouvements sont indispensables au bon fonctionnement : la rumination et l'éructation (flèches épaisses). On distingue quatre étapes principales au cours de la rumination : la régurgitation du bol alimentaire par la contraction du réseau (flèche épaisse A), la déglutition de la partie liquide du bol alimentaire (flèche épaisse B), la mastication mérycique lente (40 à 60 mouvements par minute) qui prend place dans la bouche, et une phase de repos de 5 à 6 secondes entre deux phases de mastication. L'observation des mouvements de mastication mérycique – appelé communément rumination – est intéressante car elle permet de donner une indication sur la digestion de la ration et donc sur la santé de la vache. Un arrêt de la rumination est ainsi le signe d'un dysfonctionnement digestif important.

Feuillet. Le feuillet est le 3^{ème} préestomac des ruminants. Il fait suite au réseau et précède la caillette. D'une capacité d'environ 10 litres, cet organe, dont les parois sont constituées de fines lamelles qui lui ont donné son nom (figure 6), constitue une zone de transition entre le rumen-réseau où la digestion est initiée par des fermentations, et la caillette, où la digestion est essentiellement enzymatique.

Figure 6 : La paroi interne du feuillet et sa structures en lamelles (à gauche : le feuillet ; à droite : le réseau) (photo : Dr. A Gabriel, FMV, ULg)



Caillette. La caillette est le véritable estomac des ruminants. Le bolus alimentaire n’y séjourne que 2 ou 3 heures. Il est pourvu, comme chez les monogastriques, d’une muqueuse⁵ glandulaire qui sécrète le suc gastrique. La sécrétion de suc gastrique, en conjonction avec les contractions de la musculature de la caillette, permettent une digestion enzymatique des particules alimentaires. Comme nous le verrons plus loin, la caillette est surtout le lieu où débute la digestion des protéines, qu’il s’agisse des protéines apportées directement par la ration et qui ont échappé à la dégradation microbienne, des protéines produites par les microorganismes du rumen ou encore de ces derniers eux-mêmes, qui sont lysés et digérés à leur tour par le suc gastrique. Le suc gastrique contient principalement de l’acide chlorhydrique (HCl), ainsi que différentes enzymes, qui débutent la digestion des matières grasses et des protéines. Etant donné la présence de HCl, le pH de la caillette est acide (2 à 2,5). Notons que ce pH acide permet la stérilisation du bolus alimentaire : de nombreux microorganismes venant du rumen y sont détruits.

Et chez le veau ?

L’estomac du veau nouveau-né est sensiblement différent de celui de l’adulte. Chez le nouveau-né, le rumen est très peu développé et non fonctionnel. La caillette est par contre de loin la partie la plus volumineuse de l’estomac et la gouttière œsophagienne présente un développement considérable. Ainsi, les lèvres qui bordent la gouttière œsophagienne sont capables de se refermer pour former un véritable canal reliant directement le cardia à l’orifice réticulo-omasal. Ce

⁵ Muqueuse : membrane qui tapisse l’intérieur des organes creux tels que ceux qui constituent le tube digestif

mécanisme est déclenché de façon réflexe lors de l'ingestion d'aliments liquides. Le lait arrive donc directement dans la caillette et est digéré comme chez un animal monogastrique. A la naissance, le veau nouveau-né doit donc être considéré comme un monogastrique ou un pré-ruminant. L'ingestion d'aliments solides n'induit par contre pas ce réflexe. Par conséquent, les aliments solides ingérés par le veau arrivent dans le rumen et permettent son développement. On peut considérer que le veau devient un ruminant vrai vers l'âge de 3 mois, pour autant que des aliments solides aient été distribués dès les premiers jours.

Intestin grêle

L'intestin grêle fait suite à l'estomac. Il s'agit d'un long tube cylindrique et flexueux, d'une longueur moyenne de 40 m chez le bovin adulte, dans lequel s'effectuent la digestion et l'absorption. Refoulé dans le flanc droit de l'animal par le rumen, l'intestin grêle est composé de trois parties : le duodénum, le jéjunum et l'iléum. Le duodénum est pourvu de glandes dites duodénales, qui sécrètent diverses enzymes. Il reçoit en outre les sécrétions du foie (la bile) et du pancréas (le suc pancréatique). L'ensemble de ces sécrétions permettent de poursuivre et de compléter la digestion déjà entamée au niveau de la caillette par le suc gastrique. Les glucides, les protéines et les lipides sont ainsi scindés en petites molécules qui vont être absorbées dans le jéjunum et l'iléum.

Gros intestin

Le gros intestin fait suite à l'intestin grêle et se termine au niveau de l'anus. Il est formé de trois segments successifs : le caecum, le colon et le rectum. C'est dans le gros intestin que se termine la digestion. Le caecum est un cul-de-sac cylindrique de petite taille (50 à 70 cm de long sur 10 à 12 cm de large), porté par l'intestin et situé à la limite de l'iléon et du colon. Le colon constitue quant à lui la majeure partie du gros intestin. Il se présente comme un tuyau d'une dizaine de mètres environ, qui fait suite à l'iléon et au caecum et qui se termine au niveau du rectum. Il n'y a pas de sécrétion enzymatique au niveau du gros intestin et les mouvements y sont faibles. Par contre, des fermentations similaires à celles du rumen s'y produisent, en moindre proportion toutefois, contribuant à la digestion des fibres jusque-là non digérées. Une importante absorption d'eau a lieu dans le gros intestin, de même qu'une absorption de certains nutriments. Les résidus non digérés passent ensuite dans le rectum où se forment les matières fécales, évacuées par l'anus.

Le trajet du bol alimentaire dans le tractus digestif prend de 24 à 48 heures.

II.1.2 Le fonctionnement du rumen : l'écosystème ruminal

Le rumen est un écosystème anaérobie strict⁶, peuplé par 3 catégories de microorganismes qui vivent en symbiose avec le ruminant : des bactéries, des protozoaires et des champignons. Ces microorganismes dégradent, via des processus d'hydrolyse⁷ et de fermentations, la plupart des composants de la ration alimentaire du ruminant, dans le but de couvrir leurs besoins et d'assurer ainsi leur survie. Simultanément, ils synthétisent différentes molécules nécessaires à leur développement, telles que des AA et des protéines.

⁶ Anaérobie strict : qui ne peut vivre qu'en l'absence d'oxygène

⁷ Hydrolyse : décomposition d'un composé chimique par l'eau

Les bactéries

Les bactéries sont très nombreuses dans le rumen : de l'ordre de 10 milliards par ml de jus de rumen. Plus de 200 espèces bactériennes sont présentes. Les bactéries sécrètent dans le milieu ruminal des enzymes qui assurent l'hydrolyse des protéines (protéolyse) et des glucides : cellulose (cellulolyse), hémicelluloses (hémicellulolyse), pectines (pectinolyse) et amidon (amylolyse). Certaines bactéries sont également responsables de l'hydrolyse des lipides (lipolyse) et de leur hydrogénation⁸. Notons que le rumen ne peut fonctionner en l'absence des bactéries.

Les protozoaires

Les protozoaires constituent la moitié de la biomasse du rumen. Ils sont cependant moins nombreux que les bactéries, de l'ordre de 1 million/ml de jus de rumen, mais plus grands. Ils sont plus sensibles aux conditions qui règnent dans le rumen, surtout le pH, que les bactéries. A la différence de bactéries qui sécrètent dans le milieu ruminal des enzymes hydrolytiques, les protozoaires ingèrent les particules alimentaires ainsi que les bactéries du rumen, et les dégradent. Ils participent spécifiquement au métabolisme des glucides. Ils s'attaquent ainsi à tous les constituants des parois, et sont donc en concurrence avec les bactéries, qu'ils peuvent aussi consommer.

Les champignons

Les champignons présents dans le rumen sont des champignons anaérobies cellulolytiques. Ils dégradent donc la cellulose et les hémicelluloses, et sont particulièrement abondants lors de rations riches en fourrages.

Chaque microorganisme se caractérise par la nature du substrat auquel il est capable de s'attaquer, et est donc spécialisé dans des fonctions métaboliques précises, qui peuvent être parfois assez limitées. On trouve ainsi par exemple des bactéries cellulolytiques, capables de dégrader les glucides pariétaux, des bactéries amylolytiques, capables de dégrader l'amidon, et des bactéries lipolytiques, capables de dégrader les lipides. Par conséquent, la nature de la ration influence significativement la nature de la population microbienne : un régime riche en fourrages favorisera le développement des bactéries cellulolytiques, alors qu'un régime riche en céréales favorisera celui des bactéries amylolytiques. La diversité des microorganismes présents fait néanmoins en sorte que les différentes espèces se complètent mutuellement — les produits terminaux du métabolisme d'une espèce servant de substrat pour le métabolisme d'une autre espèce —, se chevauchent et se substituent les unes aux autres.

Remarquons qu'étant donné que les composants de la ration sont dégradés par des espèces microbiennes bien spécifiques, un changement dans la ration doit toujours être fait graduellement. Une transition alimentaire est donc nécessaire. En cas de changement brutal de la ration, des perturbations sévères peuvent parfois survenir. On considère en général qu'un changement de la population microbienne du rumen prend au minimum trois semaines.

Bactéries, protozoaires et champignons sont adaptés à vivre dans un environnement caractérisé par un pH⁹ de 6,0 à 7,0, en l'absence d'oxygène, à une température de 39 à 40°C

⁸ Hydrogénation : fixation d'hydrogène

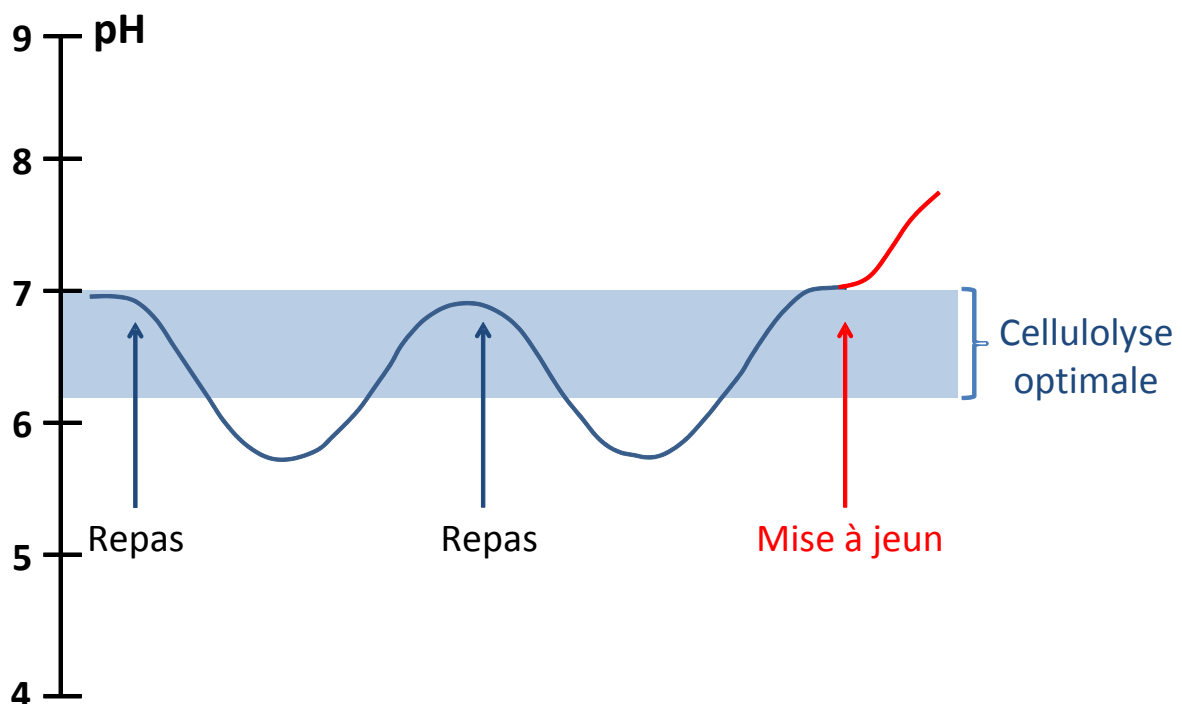
⁹ pH (ou potentiel hydrogène) : mesure de l'acidité ou basicité d'un milieu, sur une échelle de 0 à 14. Une solution est acide si son pH est inférieur à 7, basique si son pH est supérieur à 7, et neutre si son pH est égal à 7.

et en présence de métabolites¹⁰ issus des fermentations. Les principaux produits terminaux des fermentations microbiennes sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'ammoniac (NH₃) et les AGV. Ces fermentations s'accompagnent en outre d'un dégagement important de chaleur.

Pour permettre un bon maintien et développement des microorganismes du rumen favorable à une bonne digestion, il est important que le rumen présente des conditions de vie assez standard. Le pH, comme on vient de le voir, est l'un des paramètres les plus importants. Physiologiquement, il varie en général entre 6 et 7, des valeurs plus extrêmes pouvant s'observer marginalement. Les fermentations du rumen constituent la principale source de variation du pH. Leur intensité est liée à la composition des aliments ainsi qu'au rythme de distribution des repas (figure 7) :

- Après un repas, le pH diminue, car la concentration en AGV augmente fortement.
- Entre les repas, le pH augmente. En effet, d'une part, la concentration en AGV diminue suite à leur absorption progressive, et d'autre part, la rumination amène des aliments imprégnés de salive riche en bicarbonates, qui constituent un tampon efficace.

Figure 7 : Evolution du pH intra-ruminal au cours du temps



II.2 La digestion des aliments

Lors du processus de digestion, les nutriments subissent des transformations aboutissant à leur absorption ou à leur élimination par les matières fécales. Ces transformations sont décrites schématiquement ci-dessous.

¹⁰ Métabolite : produit de transformation d'une substance dans l'organisme.

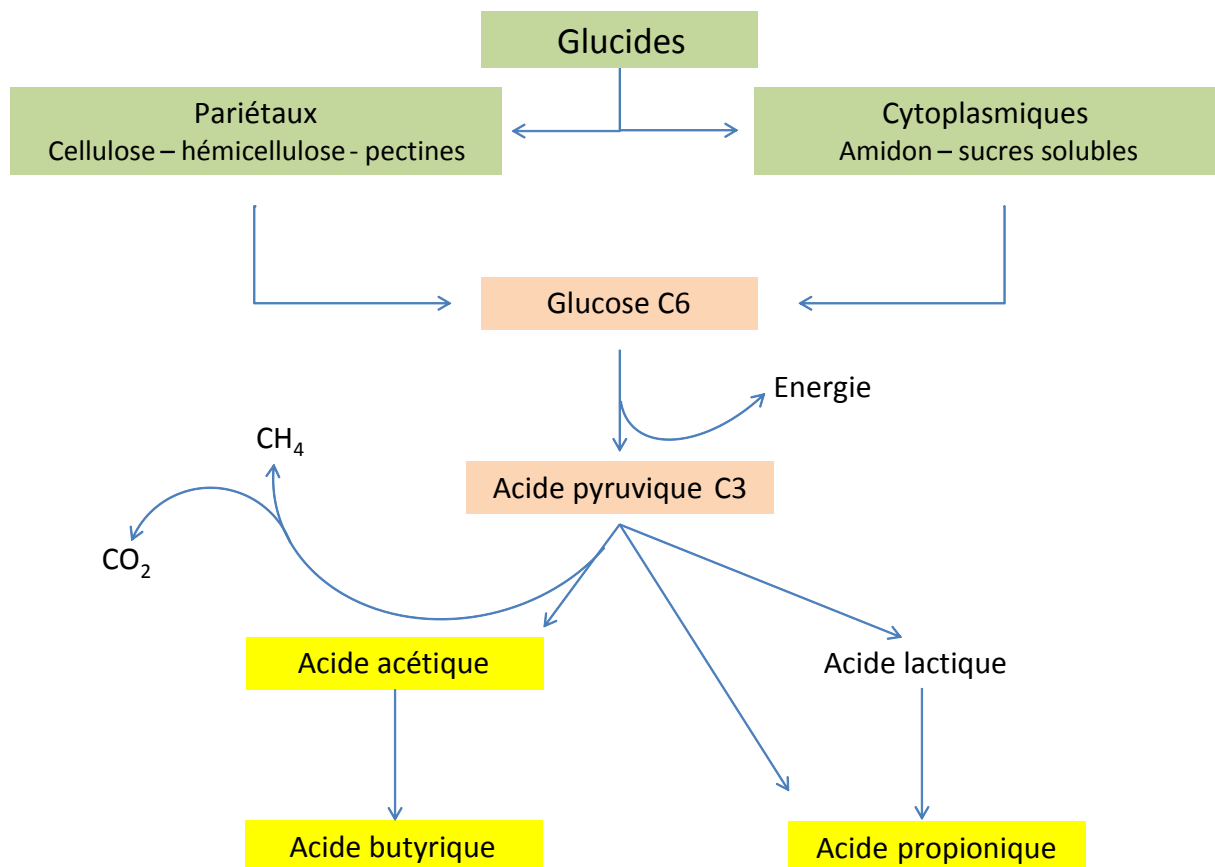
II.2.1 La digestion des glucides

Une fois arrivés dans le rumen, les glucides sont hydrolysés sous l'action des enzymes hydrolytiques microbiennes. Le glucose représente le principal produit terminal de ce processus de dégradation. Ce glucose va ensuite être converti par le jeu des fermentations microbiennes en un métabolite intermédiaire, l'acide pyruvique. Celui-ci subit une dégradation ultérieure, qui va aboutir à la formation d'un mélange d'AGV :

- Acide acétique (C2 : 0)
- Acide propionique (C3 : 0)
- Acide butyrique (C4 : 0)

L'acide lactique est quant à lui un intermédiaire de cette chaîne de dégradation. Du CO₂, du CH₄ et de la chaleur sont également produits au cours de ce processus (figure 8).

Figure 8 : Schéma de la digestion des glucides dans le rumen



Différents facteurs influencent la production des AGV. Citons ainsi la nature de la ration alimentaire, le pH intra-ruminal et le niveau d'ingestion de l'animal.

- **La ration alimentaire.** Il est important de rappeler que les différents glucides (cellulose, hémicellulose, amidon,...) sont dégradés par des populations bactériennes spécifiques ; la cellulose et l'hémicellulose sont attaquées par les bactéries cellulolytiques, alors que l'amidon est dégradé par les bactéries amylolytiques. Chaque population bactérienne utilise, pour ce faire, des voies de dégradation qui lui sont propres et qui aboutissent à la formation préférentielle de tel ou tel type d'AGV. Par conséquent, les proportions des

différents AGV produits sont principalement fonction de la composition de la ration alimentaire. L'acide acétique est majoritaire (45 à 70 % des AGV totaux), l'acide propionique représente de 15 à 25 % des AGV totaux, et l'acide butyrique 5 à 15 %.

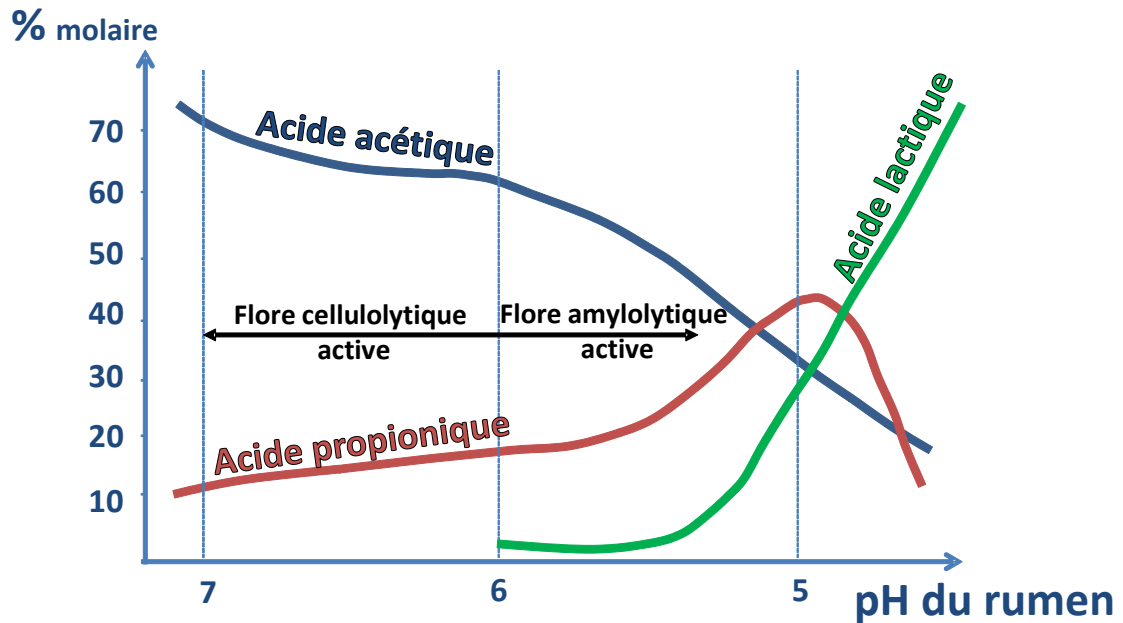
- Avec un régime riche en fourrages, les proportions d'acide acétique, propionique et butyrique sont généralement respectivement de 70 : 20 : 10.
- Avec un régime riche en céréales, la proportion d'acide acétique diminue, et celle d'acide propionique augmente, les proportions des 3 acides gras étant plutôt aux alentours de 40 : 40 : 20.
- La production d'acide butyrique est quant à elle augmentée lorsque des aliments riches en sucres solubles, tels que les betteraves, sont distribués (tableau 1).

Tableau 1 : Influence du régime alimentaire sur la composition du mélange d'AGV dans le rumen de la vache laitière (à partir de Jarrige et al 1995)

Composition en AGV (%)			
	Acide acétique C2	Acide propionique C3	Acide butyrique C4
Foin de graminées	72	17	7
Foin (44 %) + orge (56 %)	61	30	8
Foin (18 %) + betteraves (82 %)	56	26	17

- **Le pH.** Le pH intra-ruminal est un élément déterminant dans l'équilibre entre les microorganismes du rumen et dans les fermentations qui en résultent. Ainsi, une chute du pH liée au développement des bactéries amylolytiques inhibe l'activité des bactéries cellulolytiques. Ce faisant, la production d'acide acétique diminue et celle d'acide propionique et d'acide lactique augmente (figure 9).

Figure 9 : Proportions des différents A GV dans le rumen en fonction du pH (à partir de Jarrige et al 1995)



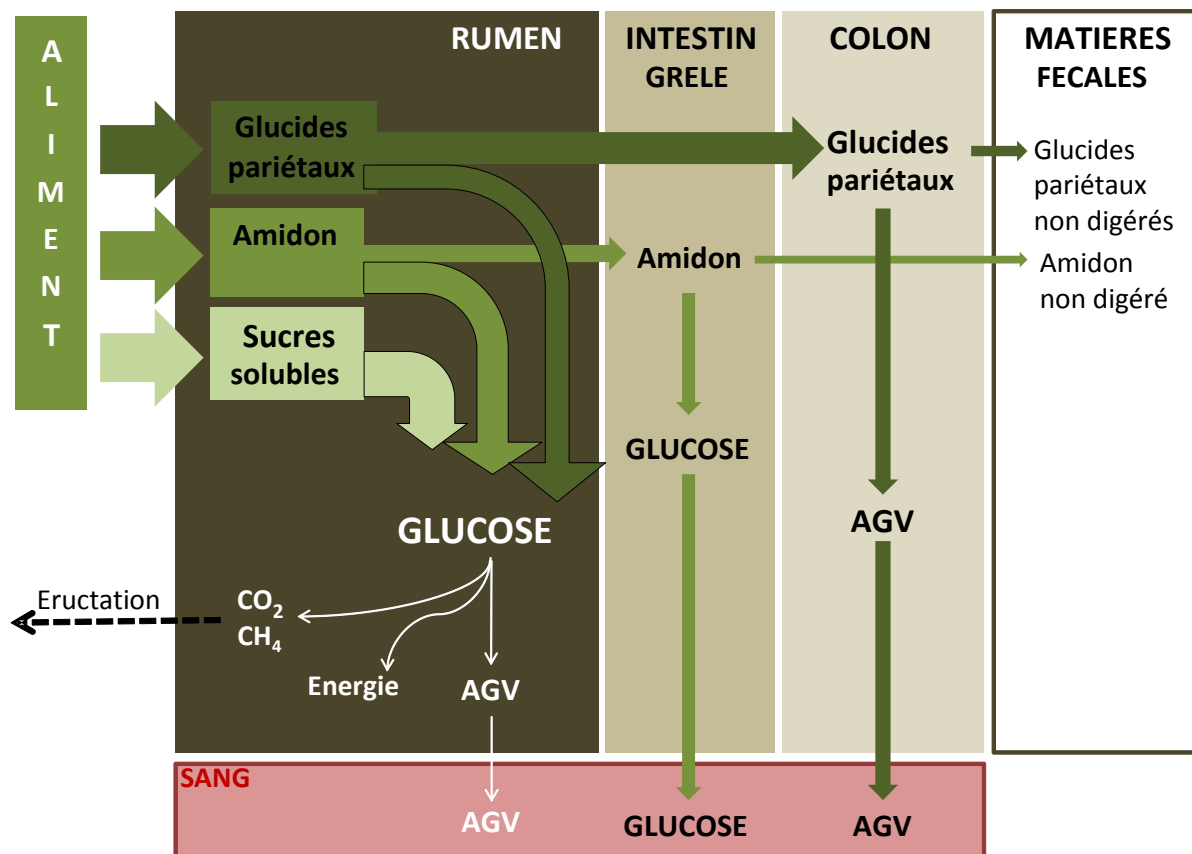
— **Le niveau d'ingestion.** La production des AGV est liée à la quantité de matières organiques digérées dans le rumen : plus le niveau d'ingestion augmente, plus la production d'AGV augmente.

Les différents AGV produits sont absorbés à travers la paroi du rumen. Ces AGV constituent pour le ruminant une source majeure d'énergie, puisqu'ils fournissent 60 à 80 % de l'énergie totale dont il a besoin à l'entretien. Les gaz produits lors des fermentations, le CO₂ et le CH₄, sont quant à eux éliminés par éructation (figure 8). La vache évacue approximativement de 300 à 400 g de gaz/jour, certaines vaches laitières à haut niveau d'ingestion pouvant aller jusqu'à 700 g/jour.

Notons que la vitesse et l'ampleur de la digestion ruminale des glucides varie selon la nature de ceux-ci et selon l'origine botanique. Les sucres solubles et l'amidon sont rapidement fermentés. La vitesse de digestion ruminale de l'amidon varie cependant selon son origine botanique. L'amidon de l'avoine, de l'orge et du blé, par exemple, est dégradé très rapidement, et est donc rapidement mis à disposition des microorganismes. On parle ainsi souvent « d'amidon à dégradation rapide » ou, plus simplement, « d'amidon rapide ». À l'inverse, le maïs, le sorgho et la pomme de terre possèdent un amidon qui est dégradé plus lentement. On parle « d'amidon lent ». L'ampleur de la dégradation de l'amidon dans le rumen est quant à lui également fonction de l'origine botanique : l'amidon de l'orge est dégradé dans le rumen à raison de 90 à 95 %, alors que celui du maïs est dégradé selon des proportions nettement moindres (50 à 90 %). Les glucides pariétaux (cellulose et hémicellulose) sont quant à eux dégradés lentement et partiellement (de l'ordre de 30 à 50 %) (figure 10). Enfin, rappelons que la lignine n'est pas dégradée par le ruminant.

Une fraction de l'amidon non digéré dans le rumen subit une digestion enzymatique dans l'intestin grêle qui entraîne la formation de glucose, absorbé à travers la paroi. L'amidon non digéré dans l'intestin grêle est en partie dégradé par les microorganismes du gros intestin. Les glucides pariétaux qui ont échappé aux fermentations microbiennes peuvent quant à eux subir une seconde fermentation dans le colon (figure 10).

Figure 10 : Schéma de la digestion des glucides chez le ruminant



AGV = acides acétique, propionique et butyrique

II.2.2 La digestion des lipides

Les rations de ruminants contiennent généralement de l'ordre de 3 à 5 % de lipides dans la MS, c'est-à-dire relativement peu par rapport aux teneurs en glucides et en matières azotées.

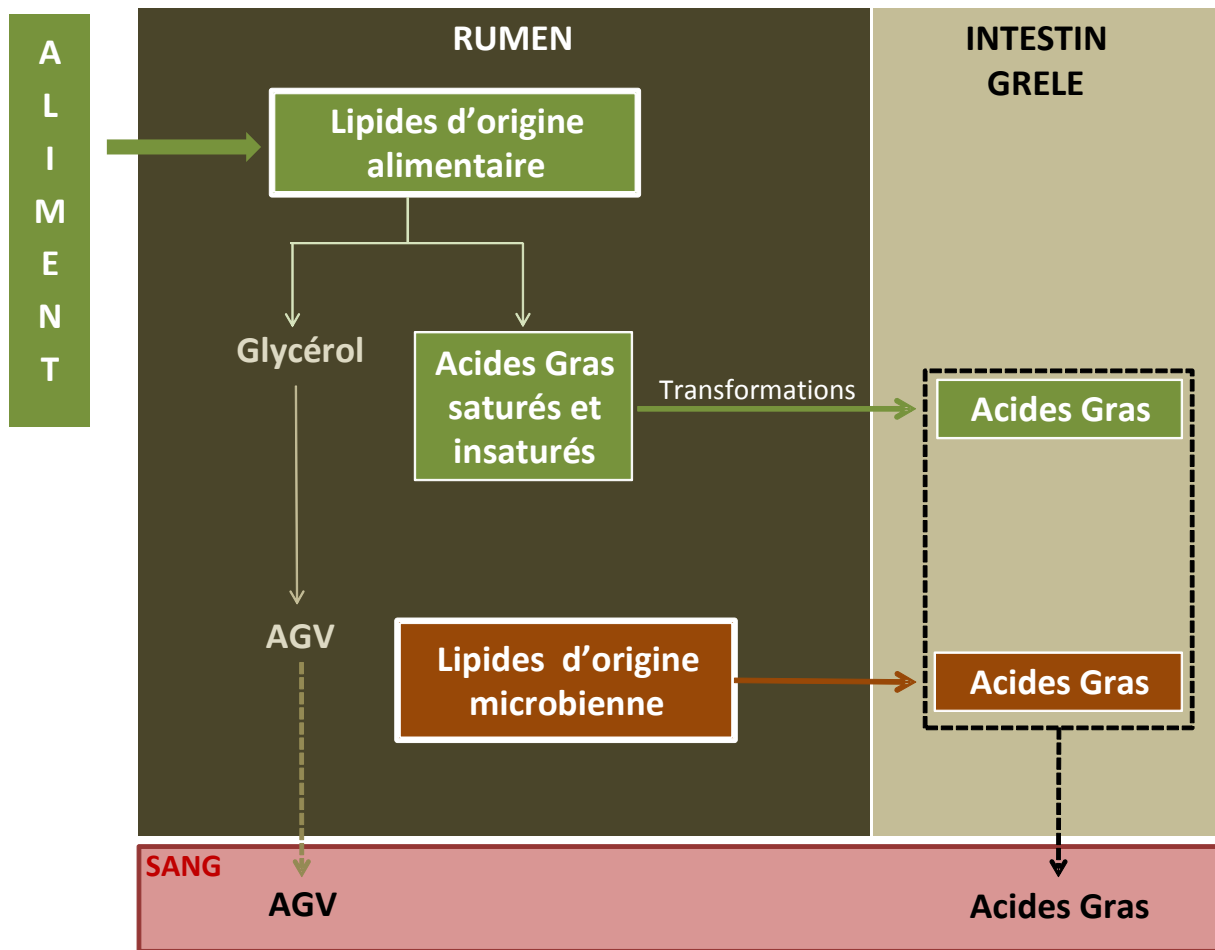
Le rumen est le siège d'une lipolyse intense et rapide : les lipides alimentaires sont hydrolysés par les microorganismes du rumen, ce qui permet la production de glycérol et d'acides gras libres. Le glycérol formé est rapidement fermenté en AGV, alors que les acides gras insaturés sont fortement remaniés par les microorganismes du rumen (figure 11).

Les acides gras libres, fixés aux particules alimentaires, quittent le rumen, passent dans la caillette, puis dans l'intestin grêle, où ils sont digérés et absorbés (figure 11).

Notons qu'à côté de leur activité de dégradation des lipides alimentaires, les microorganismes du rumen synthétisent des lipides microbiens, caractérisés notamment par la présence d'acides gras ramifiés¹¹. Lorsque ces microorganismes quittent le rumen et passent dans la caillette, ils sont tués et désintégrés par le suc gastrique. Ceci permet la libération des lipides microbiens, les acides gras libres microbiens rejoignant le pool d'acides gras libres pour subir la digestion et l'absorption intestinales (figure 11).

Figure 11 : Schéma de la digestion des lipides chez le ruminant

¹¹ Acides gras non linéaires

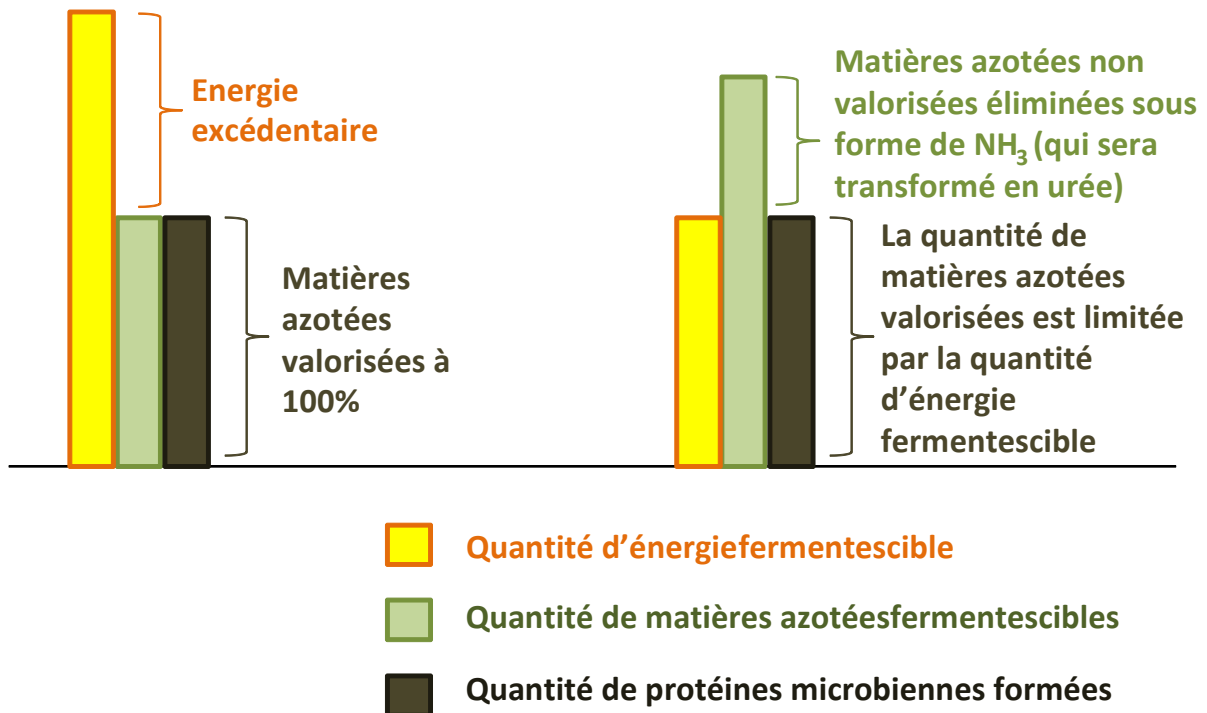


II.2.3 La digestion des matières azotées

Les matières azotées alimentaires (composées des protéines et de l'azote non protéique) subissent dans le rumen une dégradation plus ou moins importante, dont le produit terminal est l'ammoniac (NH_3) : les protéines alimentaires sont ainsi transformées en AA puis subissent une fermentation jusqu'au stade NH_3 , alors que l'azote non protéique est directement transformé en NH_3 . Cette dégradation génère la production d'une faible quantité d'énergie.

Cet ammoniac est utilisé par les microorganismes du rumen pour synthétiser leurs propres protéines, appelées *protéines microbiennes*. Cette synthèse ne peut cependant avoir lieu qu'en présence d'une quantité suffisante d'énergie disponible pour les microorganismes. Deux éléments doivent donc être présents en même temps pour qu'il y ait synthèse de protéines microbiennes : des matières azotées ET de l'énergie. Si l'un est présent en quantités plus faibles que l'autre, il sera le facteur limitant et déterminera la quantité de protéines microbiennes formées (figure 12).

Figure 12 : Quantités de protéines microbiennes formées dans le rumen selon la quantité d'énergie et de matières azotées fermentescibles



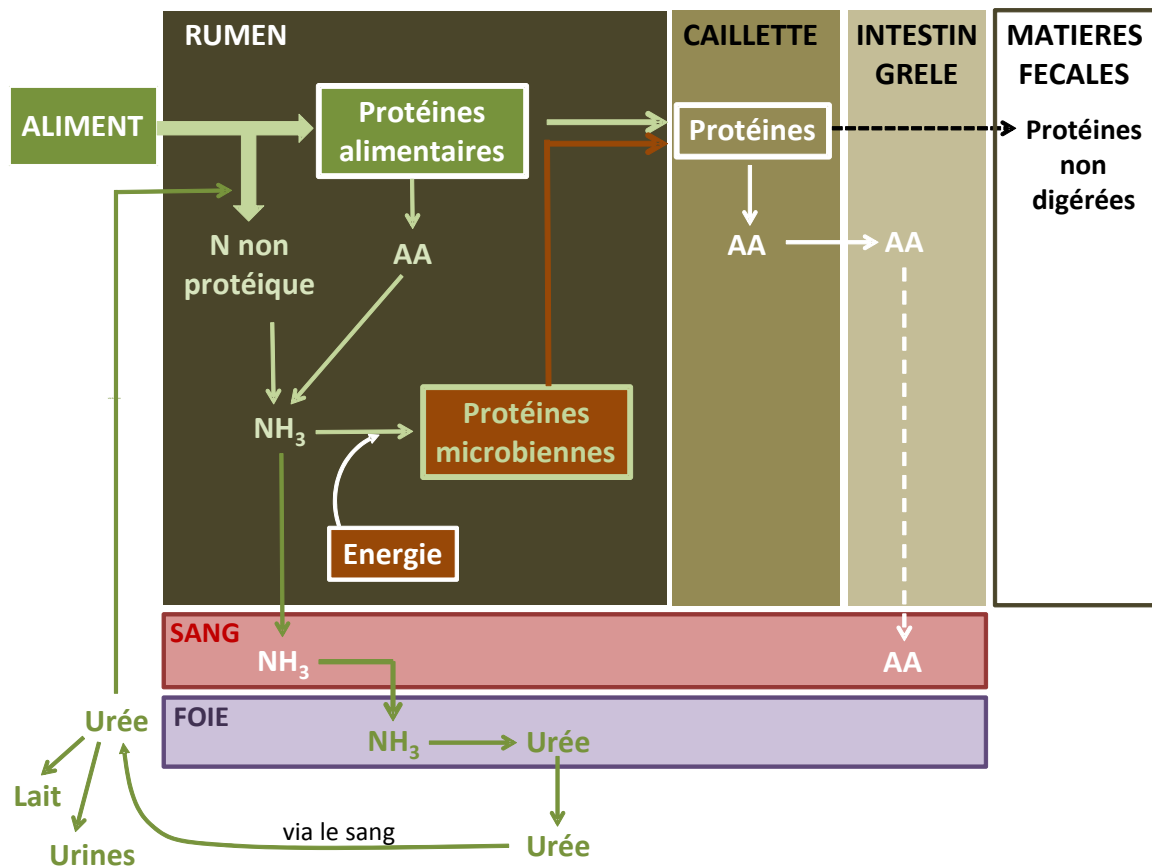
C'est principalement la dégradation des glucides qui va fournir l'énergie nécessaire à cette synthèse protéique. Par conséquent, en schématisant, on peut dire que pour se développer, la population microbienne du rumen a besoin de sources d'azote et de sources d'énergie, qui lui permettront de synthétiser les protéines nécessaires. Et pour que la totalité des matières azotées fermentescibles soit utilisée, il est nécessaire qu'il y ait suffisamment d'énergie. Dans le cas contraire, les matières azotées excédentaires seront éliminées sous forme de NH₃ potentiellement toxique.

Le NH₃ en excédent est en effet absorbé par la paroi du rumen et transporté jusqu'au foie où il est transformé en urée (figure 13). Cette urée est principalement excrétée par les reins et éliminée par les urines et le lait chez la vache laitière. Elle peut cependant également retourner au rumen *via* la salive¹². On la retrouve aussi dans les sécrétions génitales, où un excès peut perturber la nidation de l'embryon, et dans le lait, où un excès peut contribuer à l'apparition de mammite. L'urée du lait, corrélée à l'urée du sang, peut facilement être mesurée par infrarouge. Elle constitue par conséquent un précieux indicateur de l'équilibre énergie/azote de la ration et des excès d'azote dégradable.

Quel est le devenir de ces protéines microbiennes ? Une partie de la population microbienne (et donc de leurs protéines) est dégradée au sein du rumen ; une autre partie reste libre dans le liquide ruminal, et enfin une dernière partie est accrochée aux particules alimentaires. Une partie des bactéries libres et fixées aux particules alimentaires quitte le rumen et passe dans la caillette, où elle est subit alors une digestion enzymatique (figure 13).

Figure 13 : Schéma de la digestion des matières azotées chez le ruminant

¹² Un phénomène de recyclage de l'urée à travers la paroi du rumen existe également.



Remarquons qu'une partie des protéines de la ration résiste à la dégradation ruminale et passe dans la caillette, où elle est alors dégradée par voie enzymatique (« protéines *by-pass* »). Les matières azotées de la ration présentent donc une grande variabilité au niveau de leur dégradation dans le rumen-réseau : certaines sont dégradées en NH_3 dans le rumen-réseau, tandis que d'autres sont épargnées par cette dégradation. La résistance des protéines alimentaires à l'action des microorganismes ruminiaux dépend précisément de la nature de la protéine. Les protéines végétales crues (telles que celles présentes dans les fourrages) sont ainsi généralement très dégradables, celles ayant subi un traitement par la chaleur le sont moins.

Par conséquent, au niveau de la caillette et de l'intestin grêle, toutes les protéines, qu'elles soient microbiennes ou bien encore alimentaires, subissent l'action des enzymes digestives et sont dégradées en AA.

II.2.4 La digestion des minéraux

Les macro-éléments et les oligo-éléments se trouvent sous des formes chimiques variées dans les aliments. La forme sous laquelle ils se trouvent conditionne leur absorption au niveau du tube digestif. Par exemple, l'absorption du calcium est limitée lorsqu'il est présent dans l'aliment sous forme d'oxalates de calcium.

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

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

II.3 La digestibilité des aliments

II.3.1 Définitions

Les aliments ingérés par l'animal ne sont quasiment jamais digérés et absorbés en totalité : une partie se retrouve au niveau des matières fécales. On définit ainsi la digestibilité apparente d'un aliment comme la proportion d'aliments qui disparaît apparemment dans le tube digestif :

$$\text{Digestibilité apparente} = \frac{\text{Quantité ingérée} - \text{quantité excrétée dans les matières fécales}}{\text{Quantité ingérée}}$$

La digestibilité apparente est toujours inférieure à 1. Dans les revues spécialisées, le terme *coefficient de digestibilité* est parfois employé. Il s'agit de la digestibilité apparente multipliée par 100 et exprimée en pourcentage :

$$\text{Coefficient de digestibilité (\%)} = \text{Digestibilité apparente} \times 100.$$

Par convention, nous assimilerons les deux termes dans la suite du document.

La digestibilité apparente varie selon la nature de l'aliment, sa composition chimique et la présence éventuelle de facteurs antinutritionnels. Sa détermination peut être effectuée par différentes méthodes. On distingue des méthodes sur l'animal (*in vivo* par récolte des matières fécales, ou par sachet de nylon incubé dans le rumen et l'intestin grêle) ou en laboratoire (*in vitro*).

II.3.2 La digestibilité des aliments

Pour les aliments d'origine végétale, il faut distinguer, sur le plan de la digestibilité, les constituants des parois des cellules végétales (glucides pariétaux et lignine) et les constituants du contenu cellulaire (glucides cytoplasmiques, lipides et protéines). Ainsi, on peut classer les constituants selon l'ordre décroissant de digestibilité suivant : sucres solubles > amidon > hémicellulose > cellulose > lignine. La lignine, qui apparaît au cours du processus de maturation des végétaux, est indigestible. En se liant à la cellulose et à l'hémicellulose, elle rend ces constituants inaccessibles aux microorganismes et limite donc leur digestibilité. Le degré de dégradation des parois évolue donc en sens inverse de leur teneur en lignine : la digestibilité des parois d'un ray-grass jeune est de l'ordre de 90 %, alors que celle de la paille de blé n'est que de 40 %.

Selon les proportions de chaque constituant, la digestibilité des aliments varie. Ainsi, les concentrés, riches en amidon, auront une digestibilité élevée, de même que des fourrages jeunes, riches en sucres solubles. Par contre, un fourrage à un stade de végétation avancé, riche en lignine, aura une digestibilité faible.

A côté du stade de végétation, il existe d'autres facteurs affectant la digestibilité des fourrages, tels que le mode de conservation, le mode de présentation, ainsi que la composition de la ration. Ainsi, la fenaison, si elle est réalisée lors de mauvaises conditions climatiques, a pour effet de diminuer la digestibilité des fourrages car ces derniers auront été

« lavés » de leurs constituants solubles. L'ensilage et la déshydratation n'ont par contre que peu d'effets sur la digestibilité globale des aliments. Concernant le mode présentation, le broyage excessif des fourrages et leur éventuelle agglomération entraîne une diminution de leur digestibilité. Les fourrages ont en effet des temps de séjour relativement longs dans le rumen, d'autant plus s'ils sont présentés sous forme de longs brins. Si les fourrages sont broyés, le temps de séjour dans le rumen est écourté et les dégradations par fermentations sont diminuées. La diminution de la production de salive favorise de plus la chute du pH intraruminal, ce qui entraîne une diminution de l'activité des bactéries cellulolytiques, et donc une nouvelle diminution de la digestibilité.

En bref

Le système digestif des bovins présente la particularité d'être pourvu de 4 estomacs : 3 « préestomacs » (réseau, rumen et feuillet), et un estomac proprement dit, la caillette. Cette configuration particulière permet au ruminant d'effectuer une prédigestion microbienne des aliments, avec une utilisation poussée des fibres présentes dans la ration.

Le rumen est un écosystème peuplé de microorganismes qui vivent en symbiose avec le ruminant. Ces microorganismes, adaptés à vivre dans un environnement caractérisé par un pH de 6,0 à 7,0, dégradent la plupart des composants de la ration alimentaire.

Ainsi, les glucides subissent une fermentation microbienne conduisant à la formation d'un mélange d'acides gras volatils (AGV) : acide acétique (C2 : 0), acide propionique (C3 : 0) et acide butyrique (C4 : 0). L'amidon non digéré dans le rumen subit quant à lui une digestion enzymatique dans l'intestin grêle.

Les lipides alimentaires sont hydrolysés par les microorganismes du rumen, ce qui permet notamment la production d'acides gras libres. Après transformation, ceux-ci sont digérés et absorbés dans l'intestin grêle. Les microorganismes synthétisent par ailleurs des lipides microbiens. Lorsque ces microorganismes quittent le rumen et passent dans la caillette, ils sont tués et désintégrés par le suc gastrique. Ceci permet la libération des lipides microbiens ; les acides gras libres microbiens rejoignant le pool d'acides gras libres pour subir la digestion et l'absorption intestinales.

Enfin, une partie importante des matières azotées alimentaires subit dans le rumen une dégradation dont le produit terminal est principalement l'ammoniac (NH_3). Celui-ci est utilisé par les microorganismes du rumen pour synthétiser leurs propres protéines, appelées *protéines microbiennes*. Cette synthèse ne peut cependant avoir lieu qu'en présence d'une quantité suffisante d'énergie. C'est principalement la dégradation des glucides qui va fournir l'énergie nécessaire à cette synthèse protéique. De même que les protéines de la ration qui ont résisté à la dégradation ruminale, les protéines microbiennes subissent une digestion enzymatique dans la caillette, conduisant à la formation d'AA.

Les aliments ingérés par l'animal ne sont quasiment jamais digérés et absorbés en totalité. La digestibilité varie ainsi principalement selon la nature de l'aliment et sa composition chimique. La lignine, qui apparaît au cours du processus de maturation des végétaux, est indigestible. Aussi, le degré de dégradation des parois évolue en sens inverse de leur teneur en lignine.

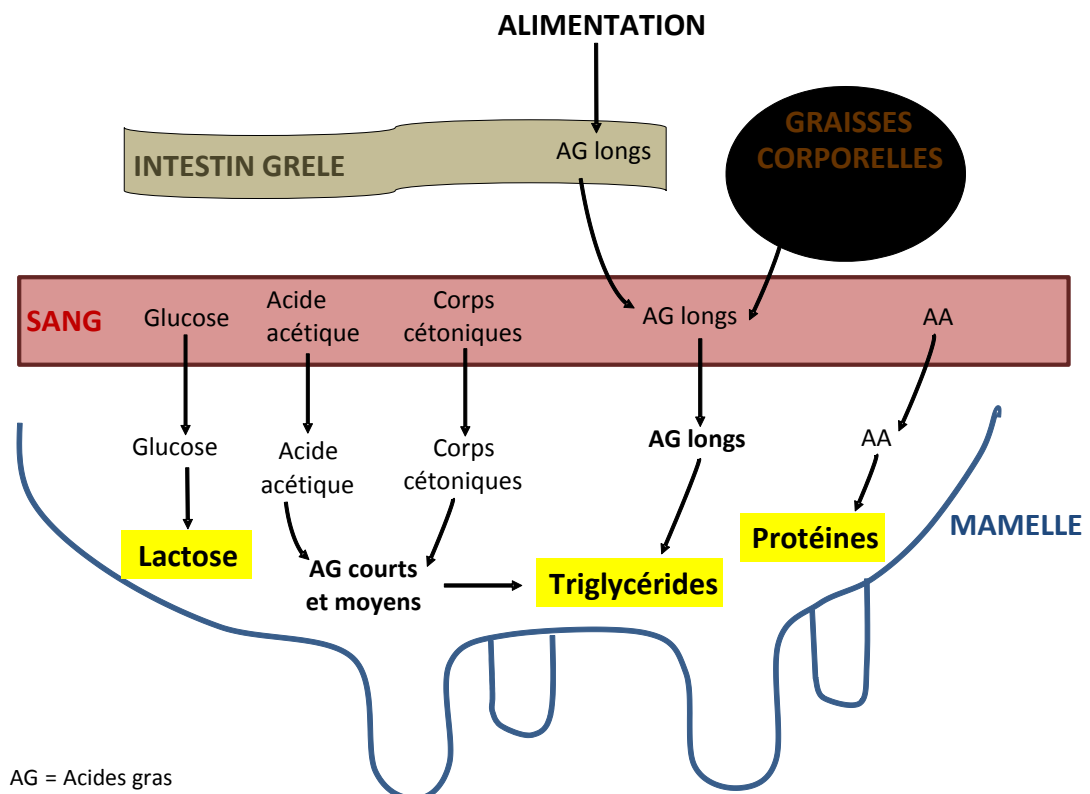
PARTIE III : LES PARTICULARITES DU METABOLISME DES GLUCIDES, DES AGV, DES LIPIDES ET DES PROTEINES CHEZ LA VACHE LAITIERE EN LACTATION

Les métabolismes complets de ces 4 groupes de substances ne seront pas vus dans ce livret, seules quelques spécificités liées à la vache laitière seront mentionnées, en particulier celles liées à la production des constituants du lait. Les différents métabolismes sont étroitement liés. Certaines molécules issues d'un métabolisme peuvent ainsi constituer des précurseurs

pour un autre métabolisme. Par exemple, retenons que les AA (métabolisme des matières azotées) peuvent servir de précurseur pour la synthèse de glucose (métabolisme des glucides), et ainsi être utilisés dans le métabolisme énergétique. Ceci explique pourquoi, lors de carence énergétique, le taux protéique du lait diminue.

La composition chimique du lait est la suivante : $\pm 87\%$ d'eau, 5% de lactose, $\pm 4\%$ de matières grasses, un peu plus de 3% de protéines et $\pm 1\%$ de minéraux. Ces constituants sont quasi tous synthétisés par la mamelle à partir d'éléments précurseurs prélevés dans le sang : glucose, acide acétique, corps cétoniques, acides gras à longue chaîne et AA (figure 14).

Figure 14 : Schéma des métabolismes permettant la synthèse du lait au sein de la mamelle



III.1 Métabolisme des glucides

Chez le ruminant, le glucose apporté par la ration représente en général moins de 5% de l'énergie absorbée, puisque celui-ci est transformé dans le rumen en AGV (*cf supra*). Par conséquent, la vache doit synthétiser du glucose à partir d'autres substances. Ce processus s'appelle la « néoglucogenèse ». Les principaux précurseurs qui vont être utilisés pour synthétiser ce glucose sont notamment l'acide propionique et certains AA. L'acide propionique est issu de la digestion microbienne des glucides. Sa transformation permet de couvrir 50 à 60% des besoins en glucose de la vache. Comme il provient davantage des fermentations liées à l'amidon, il est possible que certaines rations trop peu énergétiques ou constituées de fourrages (qui favorisent la production d'acide acétique au détriment de l'acide propionique), comme du foin, n'en produisent pas suffisamment pour des vaches en lactation. Dans ce cas, la néoglucogenèse se fait à partir d'AA. Chez la vache en lactation, ce recours aux AA peut entraîner une baisse du taux protéique du lait.

Chez la vache en lactation, le glucose revêt une importance toute particulière. Le glucose contribue en effet à la synthèse du lactose, principal constituant glucidique du lait : le lactose résulte de l'union d'une molécule de glucose et d'une molécule de galactose, cette dernière étant elle-même formée au niveau de la mamelle exclusivement à partir de glucose (figure 14). En finalité, la quantité de lait sécrétée par une vache dépend de la quantité de glucose mis à la disposition de la glande mammaire, le taux de lactose variant peu dans le lait. Une vache laitière produisant 30 L de lait doit fournir à sa glande mammaire pratiquement 2 kg de glucose en plus des 500 g nécessaires à satisfaire ses besoins d'entretien.

III.2 Métabolisme des AGV

Les AGV (acide acétique, acide propionique et acide butyrique) sont issus de la digestion microbienne des glucides. Comme nous venons de le voir, l'acide propionique est principalement utilisé pour la néoglucogenèse. Penchons-nous à présent sur le sort de l'acide acétique et de l'acide butyrique.

Retenons que l'acide acétique, après transformation, est utilisé tout d'abord pour fournir de l'énergie à l'animal. Au niveau de la mamelle, il sert de précurseur pour la synthèse des acides gras à courte chaîne et à chaîne moyenne du lait (figure 14).

L'acide butyrique est quant à lui transformé quasi totalement en corps cétoniques (acétoacétate et β -hydroxybutyrate) lors de son absorption à travers la paroi du rumen. Ces corps cétoniques sont utilisés comme fournisseurs d'énergie, mais participent aussi à la synthèse des acides gras à courte et moyenne chaînes du lait au niveau de la mamelle (figure 14).

Ces deux AGV ne peuvent pas fournir du glucose par néoglucogenèse.

III.3 Métabolisme des lipides

Les triglycérides (1 glycérol + 3 acides gras) constituent la plus grande partie des réserves de graisses de l'animal. Ils constituent aussi la majeure partie des lipides du lait. Les acides gras qu'ils contiennent ont 2 origines possibles (figure 14) :

- Une origine extra-mammaire (60 % des acides gras du lait) : les acides gras sont prélevés au niveau du sang par la mamelle, et il s'agit alors d'acides gras à longue chaîne provenant directement de l'alimentation (aliments et synthèses microbiennes) ou bien de la mobilisation des réserves corporelles
- Une origine intra-mammaire (40 % des acides gras du lait) : la mamelle synthétise elle-même des acides gras, à partir d'acide acétique et de β -hydroxybutyrate, et il s'agit alors d'acides gras à courte et moyenne chaînes.

Notons que lors de carence énergétique, la vache puise dans ses réserves corporelles, et donc dans ses graisses. Ce faisant, on observe un afflux supplémentaire dans le sang d'acides gras à longue chaîne, qui vont être prélevés par la mamelle. Ceci explique que lorsque les besoins de la vache en énergie ne sont pas couverts, comme cela est fréquemment le cas en début de lactation chez les vaches laitières de haut niveau, le taux en matières grasses du lait augmente.

Précisons enfin qu'au niveau des acides gras du lait, il existe d'une part, une composante relativement fixe, constituée par les acides gras à chaîne courte et à chaîne moyenne, et

d'autre part, une composante variable, constituée par les acides gras longs. Il est possible d'influencer dans une certaine mesure cette dernière fraction.

III.4 Métabolisme des protéines

Chez les bovins, les AA présents sont utilisés pour synthétiser des protéines, celles-ci ont une composition en AA stricte, déterminée génétiquement. Une carence en un AA essentiel (méthionine, lysine) peut limiter la production de protéines dans le lait. Les AA peuvent aussi être utilisés pour synthétiser du glucose lorsque cela est nécessaire (*cfr supra*). Par conséquent, il existe une compétition pour l'utilisation des AA entre la voie de la synthèse des protéines et la voie de la synthèse du glucose. Cette compétition est l'une des raisons qui explique le faible taux en protéines du lait lors de déficit énergétique chez la vache : les AA sont préférentiellement utilisés pour synthétiser du glucose au lieu d'être utilisés pour synthétiser les protéines du lait.

En bref

Le lait se compose de $\pm 87\%$ d'eau, 5% de lactose, $\pm 4\%$ de matières grasses, un peu plus de 3% de protéines et $\pm 1\%$ de minéraux. Ces constituants sont quasi tous synthétisés par la mamelle à partir d'éléments précurseurs prélevés dans le sang : glucose, acide acétique, corps cétoniques, acides gras à longue chaîne et AA.

Chez le ruminant, la néoglucogenèse est assurée principalement à partir de l'acide propionique, provenant en grande partie des fermentations liées à l'amidon. Chez la vache en lactation, le glucose contribue à la synthèse du lactose, principal constituant glucidique du lait.

L'acide acétique sert de précurseur au niveau de la mamelle pour la synthèse des acides gras à courte chaîne et à chaîne moyenne du lait. L'acide butyrique est quant à lui transformé quasi totalement en corps cétoniques, qui participent eux aussi à la synthèse des acides gras à courte et moyenne chaînes du lait.

Les triglycérides constituent la majeure partie des lipides du lait. Les acides gras qu'ils contiennent ont 2 origines possibles :

- Une origine extra-mammaire : les acides gras sont prélevés au niveau du sang par la mamelle, et il s'agit alors d'acides gras à longue chaîne provenant directement de l'alimentation ou bien de la mobilisation des réserves corporelles
- Une origine intra-mammaire : la mamelle synthétise elle-même des acides gras, à partir de l'acide acétique et des corps cétoniques, et il s'agit alors d'acides gras à courte et moyenne chaînes.

Chez les bovins, les AA présents sont utilisés pour synthétiser des protéines, mais aussi pour synthétiser du glucose lorsque cela est nécessaire. Ce recours aux AA peut entraîner une baisse du taux protéique du lait chez la vache laitière.

PARTIE IV : EXPRESSION DES BESOINS DES ANIMAUX ET DES APPORTS DE LA RATION

IV. 1 Les systèmes utilisés pour exprimer les besoins des animaux et les apports de la ration

Les animaux se caractérisent par 5 catégories de besoins différents, qui doivent être couverts par l'alimentation : l'énergie, les matières azotées, les minéraux, les vitamines et l'eau.

Pour pouvoir calculer des rations, il faut que les besoins des animaux et les apports alimentaires soient exprimés dans la même unité de mesure.

IV.1.1 Expression des besoins et des apports en MS

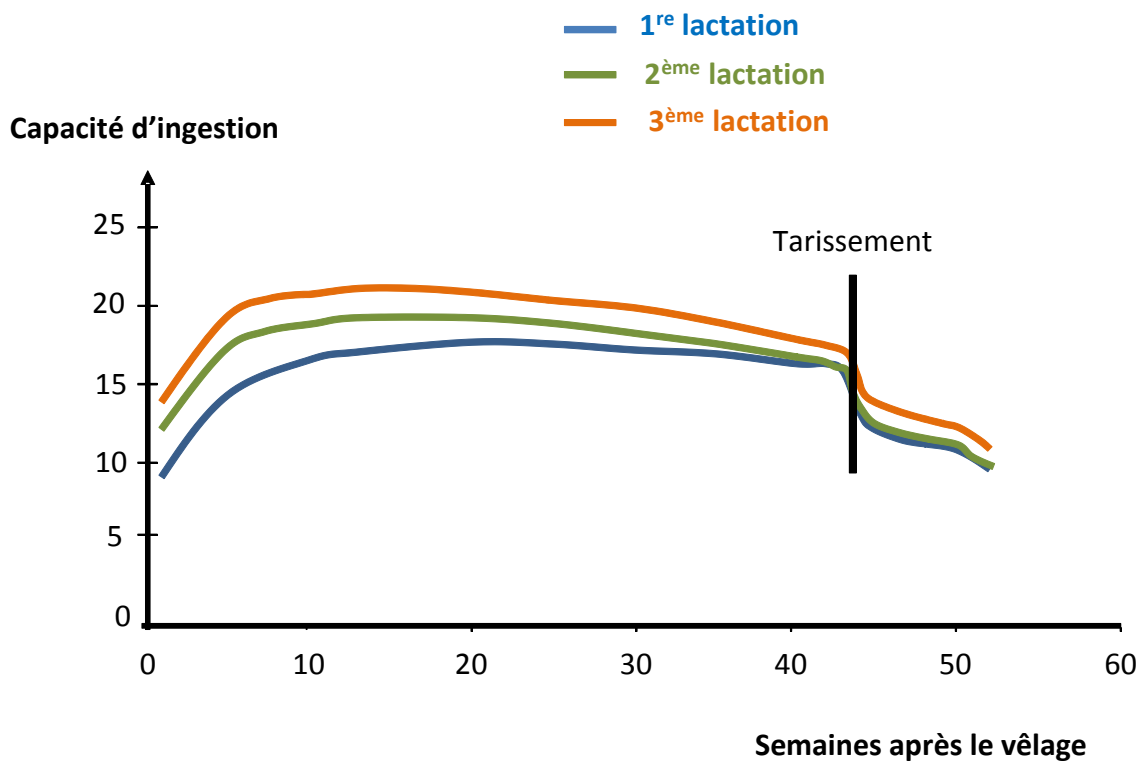
La capacité d'ingestion. Quelle est la quantité d'aliments qu'une vache peut physiquement manger ? Comment prédire les quantités qu'elle va ingérer ? La notion de *capacité d'ingestion* répond à ces questions.

La capacité d'ingestion d'une vache correspond à la quantité d'aliments distribués à volonté qu'elle ingère volontairement. Elle est influencée par plusieurs facteurs, parmi lesquels :

- La taille du rumen/le format de la vache. Une génisse en croissance présente une capacité d'ingestion plus faible qu'une vache adulte ; de même, la capacité d'ingestion d'une vache primipare est plus faible que celle d'une pluripare. Un stade de gestation avancé (au-delà de la 30^{ème} semaine) diminue également la capacité d'ingestion, le développement du fœtus dans l'abdomen réduisant la place disponible.
- Les besoins énergétiques de la vache. Chez la vache laitière, le principal facteur de variation de la capacité d'ingestion est la production laitière.
- L'état des réserves corporelles. La capacité d'ingestion diminue lorsque la vache s'engraisse.

Notons également que la capacité d'ingestion d'une vache laitière varie également avec le stade de lactation : elle est plus faible en début et en fin de lactation (figure 15).

Figure 15 : Evolution de la capacité d'ingestion d'une vache laitière (potentiel adulte de 9000 kg, en 305 jours) selon le stade de lactation et le nombre de lactations (à partir de Faverdin 2006)



En résumé, on peut dire que la capacité d'ingestion d'une vache laitière dépend de son poids, de sa production laitière, de son état corporel, de sa semaine de lactation, de sa semaine de gestation et de son âge.

Estimation précise de la capacité d'ingestion

Le système de calcul des rations français emploie une formule mathématique pour calculer précisément la capacité d'ingestion d'une vache, en tenant compte des différents paramètres qui influencent celle-ci. L'unité utilisée pour exprimer cette capacité chez la vache en lactation est alors l'UEL, pour Unité d'Encombrement Lait, 1 UEL correspondant à la consommation de 1 kg de MS du fourrage de référence (une herbe jeune au stade pâture).

Les besoins des animaux et les apports alimentaires de la ration sont toujours exprimés dans la même unité, afin de pouvoir les comparer et les faire coïncider au mieux. Aussi, les fourrages possèdent une « valeur d'encombrement », exprimée elle aussi en UEL. Cette valeur d'encombrement s'exprime par rapport à l'aliment de référence, l'herbe jeune au stade pâture : la « valeur d'encombrement d'un fourrage » est ainsi égale à la quantité consommée du fourrage de référence divisée par la quantité consommée du fourrage considéré. Ainsi, un fourrage possédant par exemple une valeur d'encombrement de 1,25 UEL sera relativement encombrant (et dans tous les cas plus encombrant que le fourrage de référence). La valeur d'encombrement d'un fourrage dépend de plusieurs facteurs : l'espèce concernée, son stade végétatif (et donc son taux de cellulose brute) et la finesse de hachage (un hachage fin diminue la valeur d'encombrement et augmente donc la quantité ingérée).

A titre d'exemple, une vache laitière de 700 kg en pleine lactation a une capacité d'ingestion de ± 17 UEL. Ceci correspond à la consommation de 17 kg de MS de l'aliment de référence, l'herbe jeune au stade pâture à 1 UEL. Ceci correspond également à la consommation de 15,6 kg de MS d'un ensilage de maïs à 25 % de MS et 1,09 UEL ($17/1,09 = 15,6$ kg de MS).

Cet exemple permet de comprendre que la connaissance de la capacité d'ingestion de l'animal et de la valeur d'encombrement du fourrage permet de déterminer la quantité de MS volontairement ingérée par cet animal.

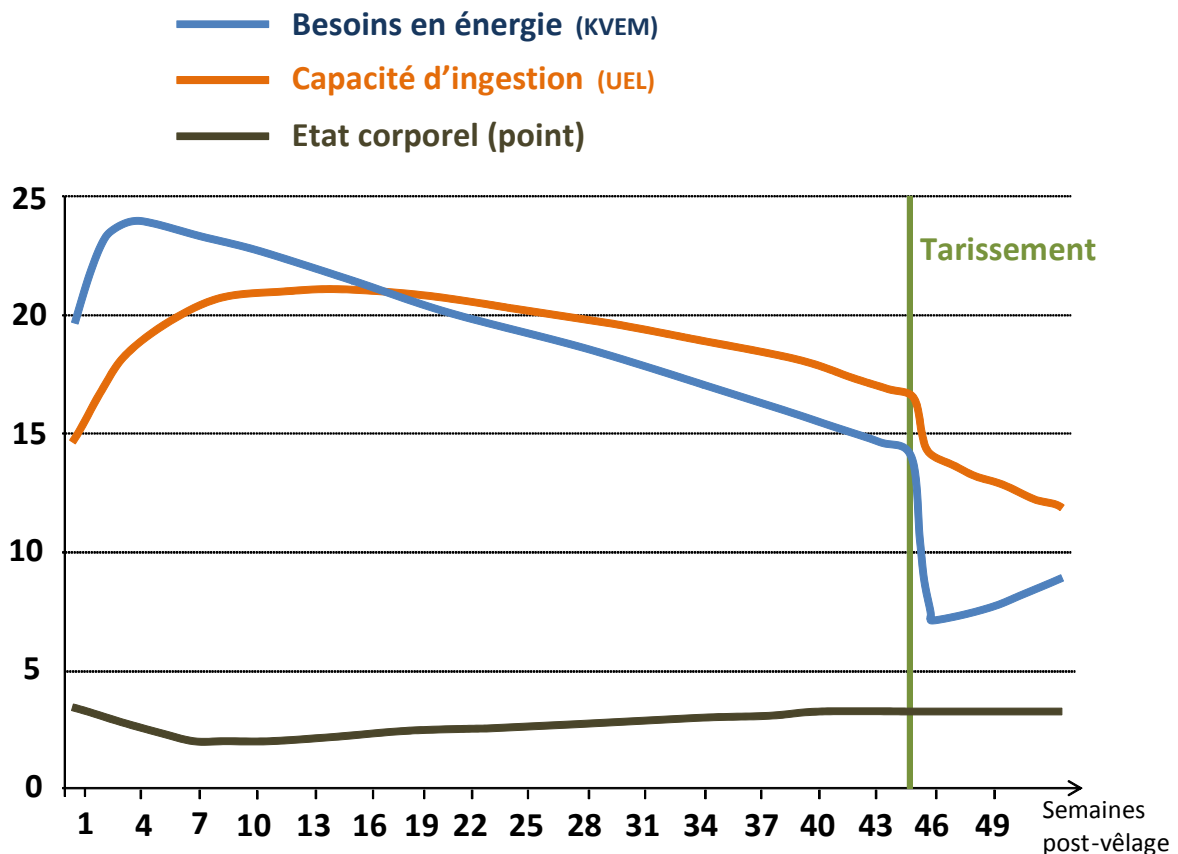
Le tableau ci-dessous présente la valeur d'encombrement de différents fourrages (en UEL/kg de MS).

Herbe jeune au stade pâture	1
Foin fané au sol par beau temps, 1^{er} cycle, début épiaison	1,02
Paille de blé	1,60
Ensilage d'herbe préfané, coupe fine, 1^{er} cycle début épiaison	1,06
Ensilage de maïs, hachage fin sans conservateur, stade laiteux-pâteux (25 % de MS)	1,09
Betteraves fourragères (19 % de MS)	0,50
Ensilage de pulpes surpressées	1,05

Remarquons enfin qu'à l'opposé de bien des fourrages, les aliments concentrés sont plus intensément et rapidement digérés. En conséquence, leur valeur d'encombrement est toujours inférieure à celle des fourrages. Leur valeur est de plus variable et dépend de facteurs liés aux animaux et à la ration.

Si la capacité d'ingestion varie beaucoup entre le début de lactation et la fin de celle-ci, il en va de même pour les besoins énergétiques (figure 16). Ainsi, en début de lactation, et surtout au moment du pic de lactation, les besoins énergétiques sont très élevés, alors que la capacité d'ingestion est réduite. Les besoins de la vache ne sont donc pas couverts et l'animal doit puiser dans ses réserves corporelles afin de combler le déficit énergétique.

Figure 16 : Evolution des besoins énergétiques, de la capacité d'ingestion et du score corporel d'une vache laitière multipare produisant 9500 kg de lait/an en fonction du stade physiologique (à partir de Brocard et al 2010)



Le niveau d'ingestion réel. Les quantités d'aliments réellement ingérés par une vache laitière dépendent d'abord de sa capacité d'ingestion. Mais d'autres facteurs influencent le niveau d'ingestion réel :

- Les caractéristiques de la ration distribuée : quantité, qualité et valeur d'encombrement des fourrages et des concentrés offerts
- La stratégie de distribution de la ration : distribution restreinte ou à volonté, facilité d'accès des vaches à la ration.

L'ingestion réelle s'exprime toujours en kg de MS/jour.

A quoi cela sert-il d'évaluer l'ingestion réelle d'un animal ? La capacité d'ingestion permet de prévoir la ration. La mesure de l'ingestion réelle, permet, elle, d'évaluer les quantités réellement ingérées et d'ajuster si nécessaire les quantités distribuées.

Quantités réellement ingérées = quantités distribuées – les refus

Remarquons qu'étant donné que les quantités sont exprimées en kg de MS, il sera nécessaire de connaître d'une part les quantités distribuées de chaque aliment, et d'autre part, leur taux respectif en MS.

- Quantités distribuées : il existe différents outils permettant d'évaluer les quantités distribuées (pont bascule, mesure de la longueur prélevée sur un silo d'ensilage,...). Par ailleurs, il faut considérer qu'un fourrage est distribué « à volonté » lorsque l'on peut constater qu'à la distribution suivante, il subsiste un surplus consommable. Les

refus sont en effet un indicateur indirect de l'ingestion, à la fois sur le plan quantitatif et sur le plan qualitatif : ils permettent d'une part d'ajuster les quantités, d'autre part d'évaluer si les vaches effectuent un tri, et enfin, au pâturage, de déterminer si le changement de parcelle s'impose (refus entamés).

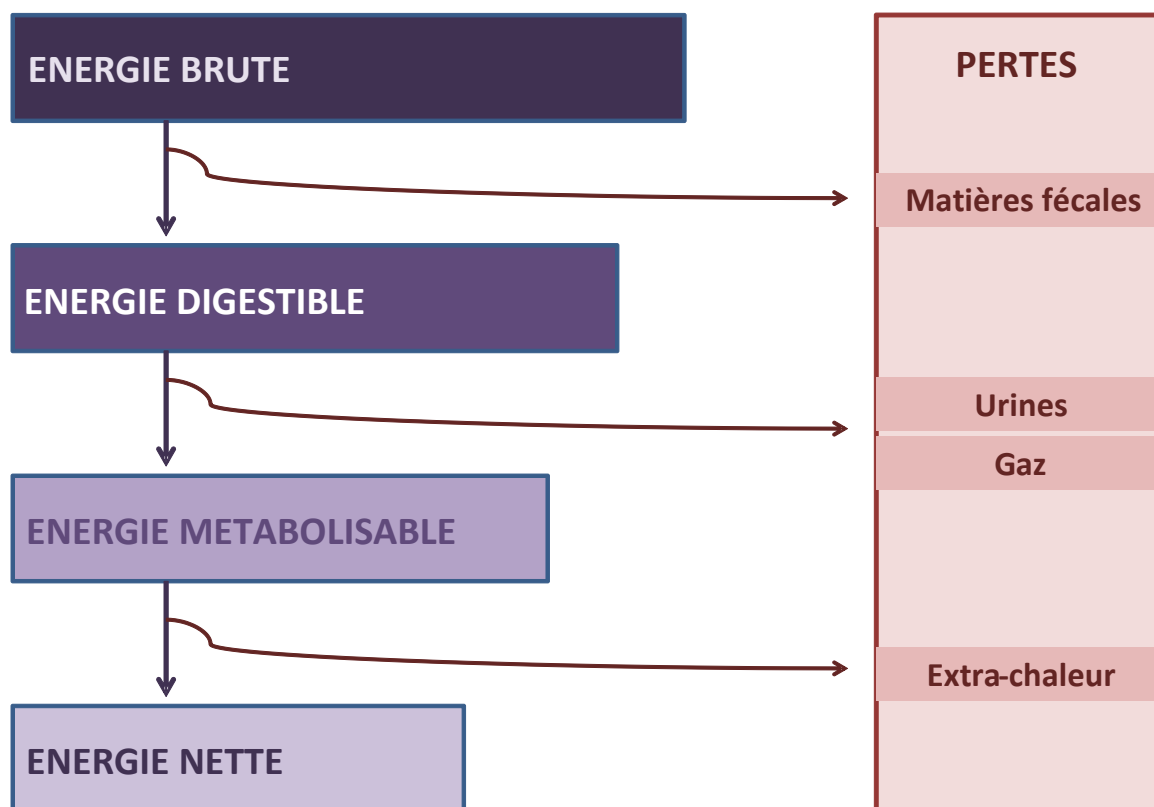
- Taux de MS : pour les fourrages, seule une analyse en laboratoire permet de connaître avec exactitude le taux en MS. Nous soulignons ici ce faisant l'importance de réaliser cette démarche pour tout éleveur souhaitant mieux contrôler le rationnement de son troupeau. Il existe néanmoins une méthode empirique permettant une estimation du taux en MS du fourrage. Celle-ci consiste à placer dans un four à micro-ondes un échantillon du fourrage de 100 g et un verre d'eau. On règle ensuite la minuterie sur 3 minutes. On pèse alors l'échantillon et on le remet au four pendant 2 minutes supplémentaires. On pèse l'échantillon à nouveau et on reprend le processus jusqu'à ce que le poids ne change plus. Le pourcentage de MS est alors égal au poids final divisé par le poids initial et multiplié par 100.
La teneur en MS des concentrés est quant à elle relativement constante et oscille la plupart du temps entre 87 et 90 %.

IV.1.2 Expression des besoins et des apports en énergie

La quantité totale d'énergie contenue dans un aliment est appelée l'énergie brute (EB). Elle varie selon la nature de l'aliment, en fonction des nutriments présents dans celui-ci.

L'EB n'est jamais valorisée complètement par l'animal (figure 17). En effet, selon la digestibilité de la ration, une fraction plus ou moins importante de l'EB se retrouve dans les matières fécales et est donc perdue. L'énergie résiduelle s'appelle l'énergie digestible (ED). Une fraction de l'ED est ensuite perdue via les urines et les gaz, l'énergie restante s'appelant l'énergie métabolisable (EM). Au niveau cellulaire, l'EM est en partie dissipée sous forme d'extra-chaaleur, c'est-à-dire un surplus de production de chaleur chez l'animal qui a fait un repas, le solde étant l'énergie nette (EN), soit l'énergie disponible pour les cellules animales.

Figure 17 : Utilisation de l'énergie des aliments chez les ruminants



L'EN est utilement employée pour les besoins d'entretien ou de production. Ceci explique que les valeurs énergétiques des aliments sont toujours exprimées en EN.

L'unité de référence de l'énergie est classiquement la calorie (cal) ou le joule. Cependant, en Belgique, pour le secteur des productions laitières, on utilise un système hollandais d'unité énergétique : le VEM (pour *Voeder Eenheid voor Melk*).

1 VEM correspond à la quantité d'EN contenue dans 1 g d'orge. Pour faciliter les calculs et matérialiser l'énergie, il a en effet été convenu de prendre un aliment de référence, en l'occurrence l'orge, et de comparer les autres aliments à sa valeur énergétique.

Ainsi, 1 kg d'orge correspond à 1000 VEM, ou encore, à 1 KVEM. Par rapport à l'unité énergétique de référence qui est la calorie, retenons que 1 kg d'orge contient 1650 Kcal d'EN.

Il est important de préciser ici que nous parlons bien de 1 kg d'orge, et non pas de 1 kg de MS d'orge.

Les teneurs énergétiques des aliments distribués aux bovins sont très variables. Le tableau 2 donne quelques exemples.

ALIMENT	TENEUR EN KVEM	TENEUR EN KVEM
	dans l'aliment frais	dans la MS
1 kg d'orge	1	1,13

1 kg de maïs grain	1,07	1,23
1 kg de pulpes séchées	0,87	0,96
1 kg de tourteau de soja	0,99	1,13
1 kg d'ensilage d'herbe préfané de très bonne qualité	0,36	0,81
1 kg d'ensilage de maïs	0,28	0,89
1 kg d'ensilage de pulpes surpressées	0,21	1,01

Comme on le voit aisément dans le tableau ci-dessus, au plus l'aliment est riche en MS (orge, maïs grain, pulpes séchées, tourteau de soja,...), au plus sa teneur en énergie exprimée dans l'aliment frais se rapproche de celle exprimée dans la MS. A l'opposé, pour un aliment tel que l'ensilage de pulpes surpressées de betteraves, pourvu d'une teneur en MS de 21 %, les différences sont considérables (0,21 KVEM/kg versus 1,01 KVEM/kg de MS).

Lors du calcul de la ration, les apports énergétiques des différents aliments présents dans la ration seront additionnés, et la valeur énergétique totale sera comparée aux besoins énergétiques de la vache.

Attention ! L'EN d'un aliment ou d'une ration correspond à l'énergie potentielle contenue dans cet aliment ou cette ration. En effet, pour qu'une valorisation optimale de l'énergie présente dans l'aliment ou la ration ait lieu, il faut que simultanément, dans le rumen, il y ait présence de cette énergie et de matières azotées, afin de permettre une synthèse de protéines microbiennes. Enfin, il importe aussi que tous les mécanismes digestifs soient opérants. De ce point de vue, les mécanismes de la digestion dans le rumen sont de la plus haute importance (ingestion, rumination, fermentation) puisque pratiquement 2/3 de l'énergie fournie à l'animal l'est sous forme d'AGV issus des fermentations microbiennes.

IV.1.3 Expression des besoins et des apports en matières azotées

Pour rappel, les matières azotées qui quittent le rumen-réseau peuvent être schématiquement classées en 2 catégories : les protéines microbiennes d'une part, et les protéines alimentaires non dégradées d'autre part. Pour qu'il y ait synthèse de protéines microbiennes, deux éléments sont nécessaires : de l'N, essentiellement sous forme de NH₃, et de l'énergie. A partir de la caillette et au niveau de l'intestin grêle, toutes les protéines, qu'elles soient microbiennes ou alimentaires, subissent une digestion enzymatique similaire.

Le système utilisé en Région wallonne pour exprimer les apports et les besoins en matières azotées des ruminants est celui utilisé en Hollande et appelé *système DVE/OEB* (DVE : *DarmVerteerbaar Eiwit* ; OEB : *Onbestendige Eiwit Balans*), élaboré en 1991. Il s'agit d'un système à deux composantes.

Les DVE désignent les *protéines digestibles dans l'intestin*. Celles-ci qualifient les apports en AA digestibles dans l'intestin pour la vache laitière et comprennent d'une

part les protéines alimentaires non dégradées dans le rumen-réseau et qui vont être digérées dans l'intestin, et d'autre part les protéines microbiennes qui viennent d'être synthétisées et qui vont, elles aussi, être digérées dans l'intestin.

Il faut toutefois savoir que ce système d'unité prend en compte les *protéines microbiennes qui peuvent être théoriquement formées à partir de l'énergie fermentescible*. La valeur DVE suppose donc qu'il y ait suffisamment d'N fermentescible dans le rumen, une situation qui n'est évidemment pas toujours rencontrée dans le rumen de la vache. Par conséquent, il peut arriver que la valeur DVE soit en partie constituée par des protéines « virtuelles », si il existe dans le rumen un excès d'énergie par rapport à l'N présent.

La valeur DVE se calcule en additionnant les protéines alimentaires non dégradées dans le rumen-réseau et les protéines microbiennes, et en soustrayant les protéines endogènes présentes dans les matières fécales. Cette dernière fraction correspond aux protéines nécessaires pour la fabrication des enzymes assurant la digestion et des cellules de la paroi intestinale, qui sont perdues avec l'excrétion fécale.

$$\text{DVE} = \text{protéines alimentaires non dégradées} + \text{protéines microbiennes} - \text{protéines endogènes}$$

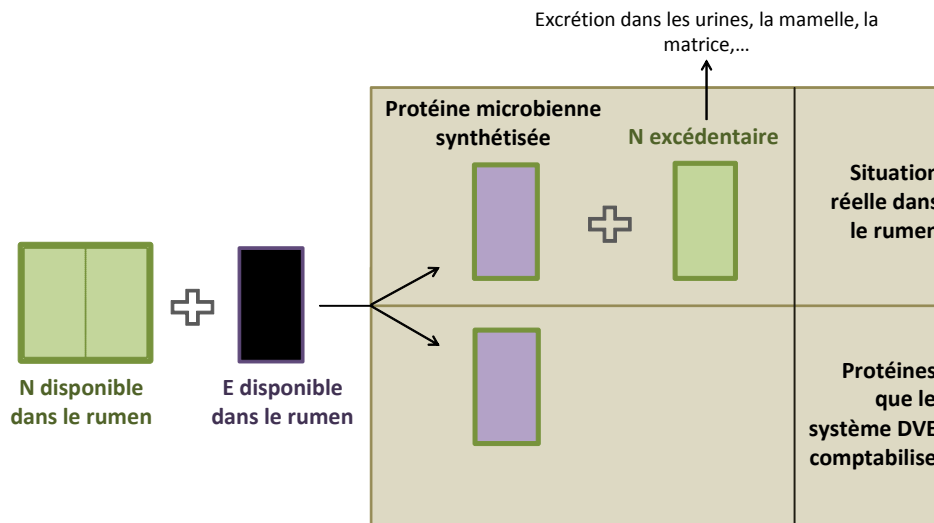
L'OEB constitue quant à lui *le bilan des protéines dégradables* dans le rumen. Il qualifie la nutrition azotée et énergétique des microorganismes du rumen. Il représente la différence entre la quantité théorique de protéines microbiennes permise par l'N fermentescible et la quantité théorique de protéines microbiennes permise par l'énergie fermentescible.

$$\text{OEB} = \text{protéines microbiennes permises par l'N} - \text{protéines microbiennes permises par l'Énergie}$$

Chaque aliment possède donc une valeur de DVE et une valeur d'OEB. Comme pour l'énergie, lors du calcul de la ration, les apports en DVE et en OEB des différents aliments présents dans la ration sont additionnés. L'apport total en DVE de la ration est alors comparé aux besoins en DVE de la vache. Dans une ration correctement formulée, les apports en DVE correspondent aux besoins en DVE de la vache. Une fois cet équilibre atteint, trois cas de figure sont possibles :

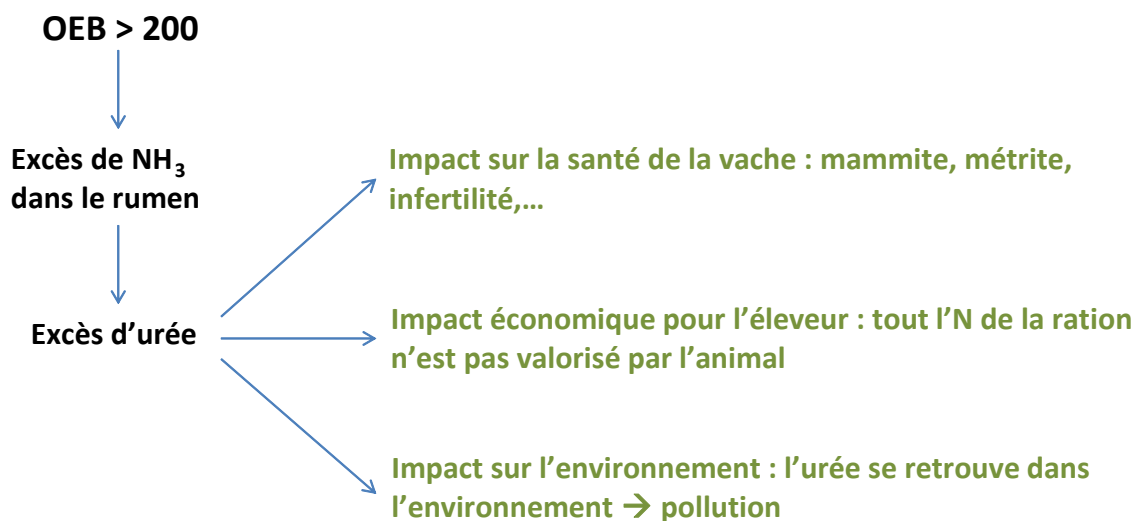
1. L'OEB de la ration est positif. Dans ce cas, il existe un excès d'N dans le rumen, c'est-à-dire de l'N fermentescible non transformé en protéines microbiennes. Le DVE exprime alors une protéine vraie. Puisque le DVE est réel, les besoins de la vache en DVE sont donc réellement couverts par la ration. L'excès d'N, qui se présente sous la forme de NH_3 , est éliminé par les urines et le lait, après transformation au niveau du foie en urée.

OEB > 0 → excès d’N par rapport à l’E dans le rumen



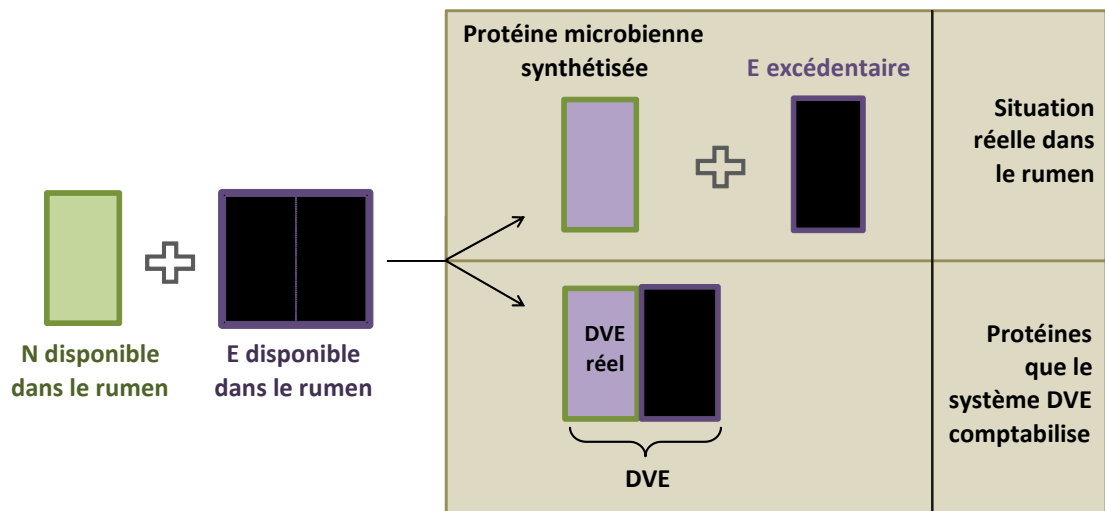
Puisque le DVE est calculé sur base de l’E présente dans le rumen, et que l’E est limitante dans le cas présent, le DVE sera réel :
 protéine microbienne réellement synthétisée = protéine microbienne théoriquement permise par l’E

Un excès d’N, s’il est limité, est acceptable. Un excès important d’N aura par contre des impacts non négligeables sur la santé de la vache : risques accrus de mammites, de métrites, diminution de la fertilité,... En outre, vu que cet N n’a pas été valorisé par l’animal mais qu’il a néanmoins été incorporé dans la ration, ceci représente une perte économique pour l’éleveur. Enfin, l’excrétion d’urée dans les urines étant augmentée, cette situation aura également des conséquences néfastes pour l’environnement. On considère en général que chez la vache laitière, l’OEB de la ration doit être positif mais inférieur à 200 g/jour dans une ration.



2. L'OEB de la ration est négatif. Dans ce cas, il existe un excès d'énergie fermentescible dans le rumen. Une partie du DVE est alors constituée de protéines virtuelles. Ce faisant, les besoins de la vache en DVE ne sont pas totalement couverts. Une telle situation doit toujours être évitée chez la vache laitière. Seul un OEB très légèrement négatif (OEB se rapprochant de 0) est acceptable.

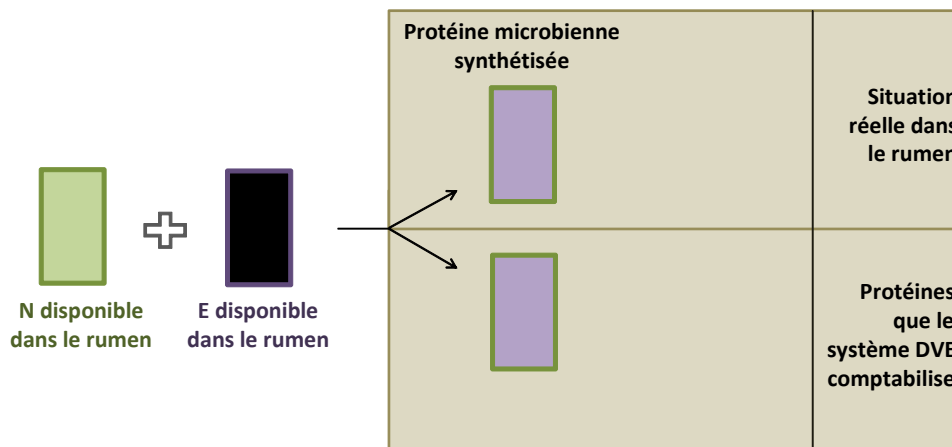
OEB < 0 → excès d'E par rapport à l'N dans le rumen



Puisque le DVE est calculé sur base de l'E présente, et que l'E est ici excédentaire, une partie du DVE sera virtuelle :
 protéine microbienne réellement synthétisée < protéine microbienne théoriquement permise par l'E

3. L'OEB de la ration est égale à 0. Il y a alors autant d'énergie que d'N fermentescible dans le rumen. Le DVE est réel, les besoins de la vache sont donc couverts par la ration.

OEB = 0 → quantité d'E présente dans le rumen = quantité d'N présent dans le rumen



Ici, le DVE est réel car l'E n'est pas limitante :
protéine microbienne réellement synthétisée = protéine microbienne théoriquement permise par l'E

Les teneurs en DVE et en OEB des aliments distribués aux vaches laitières sont très variables. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples.

ALIMENT	KVEM dans la MS	DVE g/kg MS	OEB g/kg MS
Orge	1,13	94	- 23
Maïs grain	1,23	98	- 30
Pulpes séchées	0,96	111	- 67
Tourteau de soja	1,13	261	195
Ensilage d'herbe préfané de très bonne qualité	0,81	71	65
Ensilage de maïs	0,89	49	-19
Ensilage de pulpes surpressées	1,01	100	-65

Comme on peut le voir, l'orge, le maïs grain, les pulpes séchées, l'ensilage de maïs et l'ensilage de pulpes surpressées de betteraves ont un OEB négatif. Cela signifie qu'il s'agit d'aliments apportant au niveau du rumen davantage d'énergie que d'azote fermentescible. Par conséquent, une partie de leur DVE est virtuelle, ou, autrement dit, la teneur en DVE affichée dans le tableau ne reflète pas l'apport réel en protéines digestibles dans l'intestin de l'aliment. En combinant de manière pertinente les aliments à teneur en OEB positive et négative, il est possible d'obtenir une ration dont la teneur en OEB est proche de zéro ou inférieure à 200 g/jour et d'exprimer ainsi les DVE virtuels.

Evolution du système DVE/OEB

Dans le système DVE/OEB utilisé actuellement, que nous appellerons le système DVE/OEB₁₉₉₁, deux données sont calculées pour chaque aliment : les protéines digestibles dans l'intestin (le DVE) et le bilan des protéines dégradables dans le rumen (l'OEB). **Le DVE représente la valeur protéique vraie de l'aliment, alors que l'OEB est la différence entre la quantité théorique de protéines microbiennes permise par l'N disponible et la quantité théorique de protéines microbiennes permise par l'énergie disponible.**

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été menées sur les systèmes d'évaluation de la protéine. Suite à ces développements, il est apparu qu'une mise à jour et une amélioration du système DVE/OEB₁₉₉₁ étaient nécessaires. Différentes modifications destinées à mieux évaluer la valeur protéique des aliments ont ainsi été apportées en 2010. Ces modifications concernent principalement :

- 1. La distinction de différentes fractions dans les composants des aliments, caractérisées par une dégradabilité et un taux de passage spécifiques**
- 2. L'efficacité de la synthèse protéique microbienne dans le rumen**
- 3. L'ajustement des besoins de production laitière et de gestation**

Les deux premières modifications interviennent dans le calcul des protéines microbiennes synthétisées dans le rumen (équation DVE). La 3ème intervient dans le calcul des besoins de l'animal.

- 1. La dégradabilité des aliments** peut être mesurée par la technique dite des sachets de nylon. Ces sachets contiennent des aliments mis en incubation dans le rumen pendant différentes périodes de temps. La pesée des aliments avant et après cette incubation permet de mesurer la dégradabilité dans le rumen. De plus, chacun des composants d'un aliment — par exemple, l'amidon ou les fibres NDF — peut être séparé en plusieurs fractions distinctes, caractérisées par des dégradabilités différentes. Alors que le système DVE/OEB₁₉₉₁ comptabilisait 3 fractions différentes pour chaque composant, le système DVE/OEB₂₀₁₀ en compte 4 : une fraction soluble, une fraction lessivable, une fraction non lessivable mais potentiellement dégradable et une fraction non lessivable et non dégradable. **Chacune des 4 fractions s'exprime en g/g de MS. Et pour chacune de ces fractions, un taux de dégradation dans le rumen est calculé.**

A côté de cette première nouveauté, le système DVE/OEB₂₀₁₀ tient également compte de façon plus précise de la dynamique des particules alimentaires, ou, plus précisément, des mécanismes impliqués dans l'évacuation des particules alimentaires hors du rumen. Cette évacuation se mesure via ce que l'on appelle le taux de sortie ou, plus communément, **le taux de passage**. Les taux de passage des particules alimentaires sont d'importants déterminants de la disponibilité et de l'utilisation des composants alimentaires par les microorganismes du rumen, de même que de l'efficacité de la croissance microbienne. Des études menées ces dernières années ont montré que non seulement les fourrages et les concentrés avaient des taux de passage différents, mais que leurs composants (protéines, amidon,...) également. **Par conséquent, dans le système DVE/OEB₂₀₁₀, des taux de passage spécifiques sont utilisés pour les différents composants de l'aliment, en plus de la distinction entre liquides, petites particules solides (les concentrés) et grandes particules solides (les fourrages).**

2. Pour leur synthèse protéique, les microorganismes ont besoin d'énergie ; celle-ci est principalement fournie par les fermentations des glucides contenus dans les aliments, la dégradation par fermentation des protéines alimentaires fournissant elle aussi de l'énergie, mais en quantités nettement moindre. Dans le système DVE/OEB₁₉₉₁, on considérait qu'une quantité fixe de 150 g de protéines microbiennes était produite par kg de matière organique fermentescible (ce terme désigne la matière organique qui fermente, c'est-à-dire les glucides et les protéines). Cependant, des recherches ultérieures ont montré que **l'efficacité de cette synthèse protéique** et de la croissance microbienne était principalement fonction du type de substrat fermenté et de son taux de passage, ainsi que du type de microorganismes présent dans le rumen. Le système DVE/OEB₂₀₁₀ tient compte de ces deux éléments. Il module donc l'efficacité de la synthèse protéique en fonction des composants des aliments de la ration. Ce faisant, il différencie la quantité d'énergie apportée suite à la fermentation de chaque type de composant de l'aliment : amidon, glucides pariétaux, protéines,... **Il permet ainsi une meilleure prise en compte de la synchronisation entre les apports en protéines et les sources d'énergie pour les microorganismes du rumen.**

3. **Dans le système DVE/OEB₂₀₁₀, l'évaluation des besoins en protéines de la vache liés à la production laitière et à la gestation, exprimés en g de DVE/jour, ont été revus.**

Les besoins en DVE pour la production laitière sont ainsi calculés de la manière suivante : $DVE (g/jour) = 1,396 \times MP + 0,000195 \times MP^2$

Où MP = la quantité de protéines dans le lait, exprimée en g/jour

Les besoins en DVE pour la gestation sont adaptés pour les 4 derniers mois de gestation, et sont ainsi les suivants : 62 g au 6ème mois, 107 g (au lieu de 105 g) au 7ème mois, 177 g (au lieu de 170 g) au 8ème mois et 278 g (au lieu de 270 g) au 9ème mois, pour une vache de 650 kg qui aura un veau pesant 44 kg.

Bien qu'il permette une meilleure prise en compte de la physiologie digestive du ruminant, notons que ce nouveau système n'est pas encore d'application en Région wallonne. L'évaluation des DVE auprès des laboratoires classiques, lors d'une analyse de fourrage par exemple, repose donc encore sur le système DVE/OEB₁₉₉₁.

IV.1.4 Expression des besoins et des apports en minéraux et en vitamines

Comme c'est le cas pour l'énergie et les matières azotées, les apports en minéraux et en vitamines des différents aliments de la ration doivent être évalués et additionnés, et comparés aux besoins de l'animal. Si les besoins ne sont pas couverts, un apport complémentaire en minéraux et en vitamines est alors réalisé, généralement sous la forme d'un complexe minéral-vitaminé, dont la composition sera choisie en fonction des déficits existants. Cette démarche suppose de connaître préalablement d'une part la teneur en minéraux et en vitamines des aliments de la ration, et d'autre part les besoins de l'animal.

Les apports en minéraux des aliments sont exprimés en g/kg de MS d'aliment pour les macro-éléments (Ca, P, K, Na, Cl, S et Mg). Pour les oligo-éléments (Fe, Se, Zn, Cu, I, Co, Mn), ils sont exprimés en mg/kg de MS d'aliment ou en ppm¹³. Les apports en vitamines sont quant à eux exprimés en mg/kg de MS d'aliment ou en UI¹⁴/kg de MS d'aliment. Les teneurs en minéraux et en vitamines des aliments destinés aux bovins laitiers sont très variables. Le tableau ci-dessous illustre ceci en présentant les teneurs en Ca, P, Na, Mg, Cu, Zn, Mn et vitamine A de quelques aliments couramment utilisés en rationnement laitier.

	Ca g/kg MS	P g/kg MS	Na g/kg MS	Mg g/kg MS	Cu ppm	Zn ppm	Mn ppm	Vit A UI/kg MS
Foin de luzerne	15,3 élevé	2,4	1,5	1,8	7	25	29	20 000
Feuilles et collets de betteraves	8,5 élevé	1,7	8,5 élevé	2,3	11	54	123 élevé	50 000
Ensilage de maïs	2,4	2,5	0,3 faible	1 faible	4 faible	32	30	0
Ensilage d'herbe préfané bon	6,2	4,1	2,7	1,9	8	45	106	0
Luzerne déshydratée	17 élevé	2,5	1,2	1,5	9	65	67	80 000 élevé
Pulpes séchées	12 élevé	1,2 faible	1,1	2	8	17 faible	66	0
Son	1,2 faible	12,3 élevé	0,1 faible	4,4	15 élevé	90 élevé	128 élevé	0
Tourteau de lin	4,7	9,4 élevé	1,1	5,4 élevé	21 élevé	73 élevé	59	0

¹³ ppm (partie par million) : unité de mesure désignant une concentration d'une substance égale à un millionième. Ainsi, cette unité désigne par exemple des mg/kg, des g/tonne, ...

¹⁴ UI (Unité Internationale) : unité de mesure permettant d'évaluer la quantité d'une substance sur base de son activité biologique. L'UI diffère donc d'une substance à l'autre. Ainsi, 1 UI de vitamine A = 0,33 µg de vitamine A et 1 UI de vitamine D = 0,025 µg de vitamine D.

Les modalités d'expression des besoins en minéraux et en vitamines sont différentes selon que l'on s'intéresse aux macro-éléments et aux vitamines d'une part, ou aux oligo-éléments d'autre part :

- Pour les macro-éléments et les vitamines, les besoins de l'animal sont exprimés en termes de besoins absolus, c'est-à-dire en g/jour (ou parfois en UI pour les vitamines). Par exemple, les besoins en Ca d'une vache laitière de 650 kg produisant 25 L sont de 107,5 g/jour. Ses besoins en vitamine A sont quant à eux de 90 000 UI/jour.
- Pour les oligo-éléments, il en va différemment. Les besoins en oligo-éléments des animaux ne sont en réalité pas connus avec précision. Aussi, ils sont exprimés en termes de besoins relatifs, et font l'objet de recommandations à suivre quant à la teneur en oligo-éléments à atteindre dans la MS de la ration de l'animal, avec fixation d'un seuil de carence et d'un seuil de toxicité. Les besoins en oligo-éléments sont donc exprimés en ppm ou en mg/kg de MS ingérée. Par exemple, les besoins en Cu d'une vache laitière de 650 kg produisant 25 L sont de 8 à 10 mg/kg de MS de ration ou 8 à 10 ppm.

Certains minéraux et vitamines doivent faire l'objet d'une surveillance attentive lors du calcul de ration de la vache laitière, afin précisément que les besoins soient couverts et qu'une situation d'excès ou de carence — clinique ou subclinique — apparaisse. Ainsi, au niveau des macro-éléments, il faut être particulièrement vigilant pour le Ca, le P, le Mg et le Na. Le Cl, le K et le S posent par contre rarement des problèmes. Au niveau des vitamines, il convient de vérifier la couverture des besoins de l'animal en vitamines A, D et E. Les autres vitamines (K, B et C) sont rarement problématiques puisqu'elles sont synthétisées par les microorganismes du rumen. Au niveau des oligo-éléments, une attention particulière doit être portée au cours du rationnement pour le Cu, le Zn et le Mn. L'I et le Se peuvent quant à eux parfois être problématiques. Le Fe et le Co ne le sont en général pas. Le tableau 2 indique précisément les apports recommandés dans la MS pour le Cu, le Zn, le Mn, l'I et le Se, ainsi que les seuils de carence et de toxicité.

Tableau 2. Apports recommandés et seuils de carence et de toxicité pour les principaux oligo-éléments (en mg/kg MS dans la ration).

	Seuil de carence mg/kg MS	Apports recommandés mg/kg MS	Seuil de toxicité mg/kg MS
Cu	7	8-10	30
Zn	45	50-75	250
Mn	45	50-75	1 000
I	0,15	0,2 - 0,8	8
Se	0,1	0,1	0,5

En termes d'apports alimentaires, il faut retenir que pour les minéraux, les teneurs des fourrages sont assez variables, alors que celles des aliments concentrés sont relativement stables. Par conséquent, il est toujours souhaitable de réaliser une analyse de la composition chimique de son fourrage, alors que pour les aliments concentrés, l'utilisation des tables de

composition (annexe 1) permet une estimation assez fiable des teneurs. Schématiquement retenons que pour les minéraux, au niveau des macro-éléments, les rations pour vaches laitières (sans complément minéral-vitaminé) sont souvent déficitaires en P et/ou Ca, et elles sont toujours carencées en Na. Le Mg pose en général problème chez les vaches au pâturage. Au niveau des oligo-éléments, les carences en Cu, Zn et Se sont assez courantes en Région wallonne, mais on peut parfois observer également des carences en I et en Co.

Concernant les vitamines, pour la vitamine A tout d'abord, retenons que la couverture des besoins ne pose pas de problème lorsque les vaches sont au pâturage, les fourrages verts étant de bonnes sources de vitamine A. Par contre, l'utilisation de fourrages conservés rend nécessaire un apport supplémentaire en vitamine A. Si un foin récolté dans de bonnes conditions contient de la vitamine A, ce n'est en effet pas le cas pour les ensilages, qui n'en contiennent que peu, voire pas du tout, ou pour un foin mal récolté. En outre, la vitamine A contenue dans le foin disparaît au cours du temps, si bien qu'un foin correctement récolté présente une teneur quasi nulle après 4 à 6 mois de stockage. Les aliments concentrés (céréales, tourteaux,...), de même que les racines et tubercules, en sont également quasiment dépourvus. Une supplémentation en période hivernale est donc toujours indiquée. Concernant la vitamine D, la situation est relativement similaire : les besoins des animaux au pâturage sont en général couverts ; mais les rations hivernales sont souvent déficitaires. Les céréales, les tourteaux, les racines et les tubercules ne contiennent en effet pas de vitamine D, et les teneurs des fourrages sont quant à elles mal connues. Pour la vitamine E, les fourrages verts présentant des teneurs élevées, la couverture des besoins des animaux au pâturage est assurée. Par contre, dès qu'une ration à base de fourrages conservés est distribuée, une complémentation s'impose, les teneurs des fourrages conservés et des céréales étant variables et souvent faibles.

IV.1.5 Expression des besoins et des apports en eau

L'eau est un élément indispensable de la ration : il doit être fourni avec le moins de restriction possible car il conditionne l'ingestion et donc les productions. En moyenne, une vache laitière consomme 3 à 4 L d'eau/L de lait collecté. Ces quantités peuvent cependant varier grandement. Les principaux facteurs de variation sont les suivants (tableau 3) :

- Le type d'alimentation (pâturage *versus* zéro pâturage, foin, ensilage d'herbe, ensilage de maïs,...), et plus précisément, le contenu en eau des aliments ingérés par l'animal. Une herbe jeune est en effet riche en eau (jusqu'à 850 g d'eau pour 1 kg d'herbe ingéré), alors qu'un fourrage tel que du foin est un aliment relativement sec (\pm 150 g d'eau pour 1 kg de foin ingéré).
- La température extérieure
- Le gabarit de l'animal
- Le statut physiologique de l'animal (génisse, vache en lactation, vache tarie gestante)

Tableau 3 : Références d'abreuvement chez des vaches laitières en lactation (en litres/vache/jour) selon la température extérieure, le niveau de production laitière et le type d'alimentation (à partir de Conté 2012).

Température maximale	Production de lait à 4 % (kg)	Ensilage d'herbe	Foin	Pâturage
< 20 °C	20 à 30 kg de lait	72	96	51
	30 à 35 kg de lait	72		

Un nombre suffisant d'abreuvoirs doit être prévu : on conseille un abreuvoir individuel pour 10 vaches ou une longueur minimale de 65 cm si l'eau est présentée dans un bac. Il faut veiller à ce que le débit soit suffisant (> 10 L/minute) et que les abords des points d'eau soient facilement accessibles (pas de sols glissants ou boueux). L'idéal est de disposer de 2 points d'eau pour un même groupe de vache afin de diminuer les problèmes d'accès pour les vaches dominées.

Une gestion de la quantité d'eau consommée à l'échelle de l'exploitation ?

Actuellement, peu d'élevages ont installé un compteur d'eau sur leur réseau privé. Et pourtant, c'est la première étape pour tout éleveur soucieux de maîtriser la quantité d'eau consommée. Bien gérer l'eau sans gaspillage sera en effet sans nul doute une nécessité dans un avenir plus ou moins proche. L'abreuvement, qui représenterait ± 74 % de la consommation, est incompressible. Cependant, des économies peuvent être réalisées en détectant précocement les fuites, en étant vigilant par rapport aux autres postes de consommation : nettoyage du bloc de traite, du tracteur et de ses équipements,... ou en récupérant les eaux de toiture.

La qualité de l'eau est aussi très importante : elle doit être fraîche et propre tant au niveau chimique que bactériologique. Les normes de potabilité humaine relatives aux critères bactériologiques devraient idéalement être reprises : une eau est considérée comme conforme si elle ne contient pas d'E. coli ou d'entérocoque dans un échantillon de 100 ml d'eau. Ces deux microorganismes sont en effet utilisés comme des bactéries indicatrices d'une pollution fécale. Il est donc nécessaire de vérifier l'état de propreté des abreuvoirs — qui peuvent contenir des matières fécales, des restes d'aliments, des feuilles, ... — et de les nettoyer régulièrement.

IV. 2 Les besoins des animaux

IV.2.1 Besoins d'entretien et besoins de production

Tout animal effectue des dépenses pour son entretien et ses productions. On parle donc de besoins d'entretien et de besoins de production.

- Les besoins d'entretien d'une vache laitière correspondent aux besoins de l'animal pour se maintenir en vie à un poids constant et sans production aucune. Ils comprennent les besoins du métabolisme basal, c'est-à-dire ceux de l'animal strictement au repos et les besoins liés au mode de vie (activité physique). Ainsi, le pâturage, qui requiert des déplacements de la part de l'animal, génère des dépenses plus élevées que la stabulation libre ou encore entravée, et correspond donc à des besoins plus élevés.
- Les besoins de production correspondent aux besoins de la vache pour assurer ses productions : croissance, gestation, production laitière et engraissement.

Lors du calcul de rations, il convient de prendre en compte ces différents besoins. Ils sont calculés en utilisant des formules. Chez la vache laitière, schématiquement, on distingue 2 cas de figure possibles : soit la vache est en lactation, soit elle est tarie et gestante.

- Vache en lactation : ce premier cas de figure correspond aux vaches en lactation non gestantes, mais aussi aux vaches en lactation gestantes (Tableau 4).
- Vache tarie et gestante : ce cas de figure correspond aux vaches qui sont taries et gestantes (Tableau 4). D'un point de vue pratique, il s'agit donc des vaches taries qui sont au 8^{ème} ou 9^{ème} mois de gestation.

Précisons enfin que préalablement au calcul de ration, il convient de connaître idéalement le poids de l'animal. On considère qu'en général, une vache laitière Holstein a un poids se situant entre 650 (petit gabarit) et 750 kg (grand gabarit). La pesée de l'animal est évidemment toujours souhaitable afin d'éviter de sous-alimenter ou de suralimenter les animaux.

Tableau 4 : Recommandations alimentaires d'une vache laitière à l'entretien, d'une vache laitière en lactation et d'une vache laitière tarie en gestation

	Vache à l'entretien	Vache en lactation	Vache tarie en gestation (8 ^{ème} ou 9 ^{ème} mois)
Paramètres			
MS (kg)	1,4 x (poids/100 + 2)	1,4 x (poids/100 + 2) + 0,37 x L*	1,4 x (poids/100 + 2) - 1,5
VEM	6,45 x poids + 1 265	Si production ≤ 15 kg : 6,45 x poids + 1 265 + 442 x FCL** x L Si production > 15 kg : (6,45 x poids + 1 265 + 442 x FCL x L) x [1 + 0,00165 x (FCL x L - 15)] Si gestation au 6 ^{ème} mois : + 450 Si gestation au 7 ^{ème} mois : + 850 Si 1^{ère} lactation : + 330 Si 2^{nde} lactation : + 660	6,45 x poids + 1 265 8 ^{ème} mois : + 1 500 9 ^{ème} mois : + 2 700 (Idéalement, 1 à 2 semaines avant le vêlage : + 4 000)
DVE (g)	Poids/10 + 54	Poids/10 + 54 + 1,396 x MP*** + 0,000195 x MP² Si gestation au 6 ^{ème} mois : + 62 (+ 112⁺) Si gestation au 7 ^{ème} mois : + 107 (+ 193⁺) Si 1^{ère} lactation : + 38 Si 2^{nde} lactation : + 19	Poids/10 + 54 8 ^{ème} mois : + 177 (+ 319⁺) 9 ^{ème} mois : + 278 (+ 500⁺)
Macro-éléments (g)			
Ca	5 x poids/100	5 x poids/100 + 3 x L	5 x poids/100 + 15
P	3 x poids/100	3 x poids/100 + 2 x L	3 x poids/100 + 9
Na	2 x poids/100	2 x poids/100 + L	2 x poids/100 + 5
Mg	1,6 x poids/100	1,6 x poids/100 + 0,5 x L	1,6 x poids/100 + 5
Oligo-éléments (ppm)			
Cu			8 – 10
Zn			50 – 75
Mn			50 – 75
Vitamines (UI)			
A	10 000 x poids/100	10 000 x poids/100 + 1 000 x L	10 000 x poids/100 + 100 000
D	1 000 x poids/100	1 000 x poids/100 + 100 x L	1 000 x poids/100 + 10 000
E	30 x poids/100	30 x poids/100 + 3 x L	30 x poids/100 + 0

*L= kg de lait produit par la vache/jour

**FCL (facteur de correction du lait) = $(0,337 + 0,116 \times \% \text{ Matières Grasses du lait} + 0,06 \times \% \text{ Protéines du lait})$

***MP = Quantité de protéines dans le lait (g/jour) = kg de lait/jour x % Protéines x 10

+ = gestation gémellaire

Prenons quatre exemples pour illustrer ce tableau. Le 1^{er} concerne une vache laitière en lactation à 30L/jour non gestante ; le second, une vache laitière en lactation à 20L/jour gestante de 3 mois ; le 3^{ème}, une vache laitière en lactation à 20L/jour gestante de 6 mois ; et le 4^{ème}, une vache laitière tarie au 9^{ème} mois de gestation. On considère que ces vaches sont en 3^{ème} lactation et sont gestante d'un seul veau.

Après avoir utilisé les formules ci-dessus pour calculer les besoins respectifs de ces 4 types de vaches, nous comparerons leurs besoins en termes relatifs (en %, par rapport au cas n°2, la vache à 20L/jour gestante de 3 mois)

1. Soit une vache laitière de 650 kg en lactation produisant 30 L de lait/jour (non gestante) avec un taux de matières grasses de 4 % et un taux protéique de 3,2 %.

	Besoins totaux de la vache
MS	$1,4 \times (650/100 + 2) + 0,37 \times 30 = 22,2 \text{ kg}$
VEM	$FCL = 0,337 + 0,116 \times 4,0 + 0,06 \times 3,2 = 0,993$ $(6,45 \times 650 + 1\ 265 + 442 \times 0,993 \times 30) \times [1 + 0,00165 \times (0,993 \times 30 - 15)] = 19\ 079 \text{ VEM}$ = 19,1 KVEM
DVE	$MP = 30 \times 3,2 \times 10 = 960$ $\rightarrow 650/10 + 54 + 1,396 \times 960 + 0,000195 \times 960^2 = 1\ 639 \text{ g}$
Ca	$5 \times 650/100 + 3 \times 30 = 122,5 \text{ g}$
P	$3 \times 650/100 + 2 \times 30 = 79,5 \text{ g}$
Na	$2 \times 650/100 + 30 = 43 \text{ g}$
Mg	$1,6 \times 650/100 + 0,5 \times 30 = 25,4 \text{ g}$
Cu	8 - 10 ppm
Zn	50 - 75 ppm
Mn	50 - 75 ppm
Vit A	$10\ 000 \times 650/100 + 1\ 000 \times 30 = 95\ 000 \text{ UI}$
Vit D	$1\ 000 \times 650/100 + 100 \times 30 = 9\ 500 \text{ UI}$
Vit E	$30 \times 650/100 + 3 \times 30 = 285 \text{ UI}$

2. Soit une vache laitière de 650 kg en lactation (gestante de 3 mois) produisant 20 L de lait/jour avec un taux de matières grasses de 4 % et un taux protéique de 3,2 %.
 La gestation étant peu avancée (< 6^{ème} mois), elle n'entre pas en ligne de compte dans le calcul des besoins.

	Besoins totaux de la vache
MS	$1,4 \times (650/100 + 2) + 0,37 \times 20 = 19,3 \text{ kg}$
VEM	$FCL = 0,337 + 0,116 \times 4,0 + 0,06 \times 3,2 = 0,993$ $(6,45 \times 650 + 1\ 265 + 442 \times 0,993 \times 20) \times [1 + 0,00165 \times (0,993 \times 20 - 15)] = 14\ 350 \text{ VEM}$ = 14,4 KVEM
DVE	$MP = 20 \times 3,2 \times 10 = 640$ $\rightarrow 650/10 + 54 + 1,396 \times 640 + 0,000195 \times 640^2 = 1\ 092 \text{ g}$
Ca	$5 \times 650/100 + 3 \times 20 = 92,5 \text{ g}$

P	$3 \times 650/100 + 2 \times 20 = 59,5 \text{ g}$
Na	$2 \times 650/100 + 20 = 33 \text{ g}$
Mg	$1,6 \times 650/100 + 0,5 \times 20 = 20,4 \text{ g}$
Cu	8 - 10 ppm
Zn	50 - 75 ppm
Mn	50 - 75 ppm
Vit A	$10\ 000 \times 650/100 + 1\ 000 \times 20 = 85\ 000 \text{ UI}$
Vit D	$1\ 000 \times 650/100 + 100 \times 20 = 8\ 500 \text{ UI}$
Vit E	$30 \times 650/100 + 3 \times 20 = 255 \text{ UI}$

3. Soit une vache laitière haute productrice de 650 kg en lactation (gestante de 6 mois) produisant 20 L de lait/jour avec un taux de matières grasses de 4 % et un taux protéique de 3,2 %.

Dans ce cas de figure, la vache étant à son 6^{ème} mois de gestation, un ajustement des besoins en VEM et en DVE est nécessaire : + 450 VEM et + 62 g de DVE. Par contre, les besoins en MS, minéraux et vitamines ne sont pas modifiés par la gestation.

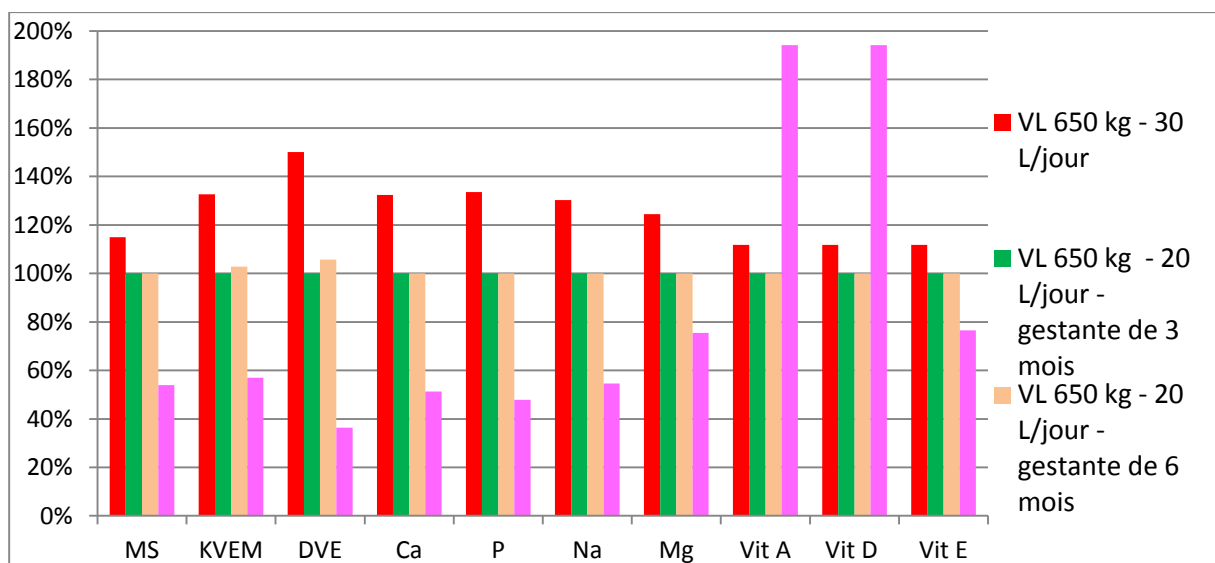
	Besoins totaux de la vache
MS	$1,4 \times (650/100 + 2) + 0,37 \times 20 = 19,3 \text{ kg}$
VEM	$FCL = 0,337 + 0,116 \times 4,0 + 0,06 \times 3,2 = 0,993$ $(6,45 \times 650 + 1\ 265 + 442 \times 0,993 \times 20) \times [1 + 0,00165 \times (0,993 \times 20 - 15)] + 450 = 14\ 800 \text{ VEM}$ = 14,8 KVEM
DVE	$MP = 20 \times 3,2 \times 10 = 640$ $\rightarrow 650/10 + 54 + 1,396 \times 640 + 0,000195 \times 640^2 + 62 = 1\ 154 \text{ g}$
Ca	$5 \times 650/100 + 3 \times 20 = 92,5 \text{ g}$
P	$3 \times 650/100 + 2 \times 20 = 59,5 \text{ g}$
Na	$2 \times 650/100 + 20 = 33 \text{ g}$
Mg	$1,6 \times 650/100 + 0,5 \times 20 = 20,4 \text{ g}$
Cu	8 - 10 ppm
Zn	50 - 75 ppm
Mn	50 - 75 ppm
Vit A	$10\ 000 \times 650/100 + 1\ 000 \times 20 = 85\ 000 \text{ UI}$
Vit D	$1\ 000 \times 650/100 + 100 \times 20 = 8\ 500 \text{ UI}$
Vit E	$30 \times 650/100 + 3 \times 20 = 255 \text{ UI}$

4. Soit une vache laitière de 650 kg, tarie, au début du 9^{ème} mois de gestation.

	Besoins totaux de la vache
MS	$1,4 \times (650/100 + 2) - 1,5 = 10,4 \text{ kg}$
VEM	$6,45 \times 650 + 1\ 265 + 2\ 700 = 8\ 158 \text{ VEM}$ = 8,2 KVEM
DVE	$650/10 + 54 + 278 = 397 \text{ g}$
Ca	$5 \times 650/100 + 15 = 47,5 \text{ g}$
P	$3 \times 650/100 + 9 = 28,5 \text{ g}$

Na	$2 \times 650/100 + 5 = 18 \text{ g}$
Mg	$1,6 \times 650/100 + 5 = 15,4 \text{ g}$
Cu	8 - 10 ppm
Zn	50 - 75 ppm
Mn	50 - 75 ppm
Vit A	$10\ 000 \times 650/100 + 100\ 000 = 165\ 000 \text{ UI}$
Vit D	$1\ 000 \times 650/100 + 10\ 000 = 16\ 500 \text{ UI}$
Vit E	$30 \times 650/100 + 0 = 195 \text{ UI}$

Comparons à présent à l'aide d'un graphique les besoins dans ces 4 conditions physiologiques différentes, en prenant comme point de référence le cas de figure n°2, à savoir la vache laitière à 20L/jour gestante de 3 mois, dont les besoins sont fixés à 100 %.



Il est aisé de voir que :

- Lorsqu'on passe d'une production de 20 à 30 L, les besoins en KVEM et DVE augmentent considérablement (+ 33 % pour les KVEM et + 50 % pour le DVE), de même que ceux en minéraux (plus ou moins + 30 % pour chacun d'entre eux). Les besoins en MS augmentent quant à eux de 15 % ; par conséquent, la densité énergétique de la ration doit idéalement augmenter considérablement pour faire face à l'augmentation plus importante des besoins en KVEM et DVE ;
- A production laitière identique (20 L), le passage du 3^{ème} mois de gestation au 6^{ème} mois de gestation n'augmente que très légèrement les besoins en KVEM (+ 3 %) et en DVE (+ 6 %), les autres besoins étant inchangés ;
- Les besoins de la vache au tarissement sont beaucoup plus faibles que lorsqu'elle est en production (- 38 % pour la MS, - 43 % pour les KVEM, - 64 % pour les DVE) à l'exception de ses besoins en vitamine A et D qui sont multipliés approximativement par 2.

IV.2.2 Des besoins aux apports alimentaires

Le rationnement consiste à couvrir les besoins de l'animal — besoins énergétiques, azotés, minéraux et vitaminiques — en maximisant la fraction fourragère.

D'un point de vue pratique, il convient d'ajuster au mieux les apports alimentaires aux besoins, en prenant une certaine marge de sécurité. Ces « *apports alimentaires recommandés* » sont donc supérieurs aux besoins. Cette marge de sécurité se justifie notamment en raison des incertitudes sur les caractéristiques des aliments (valeurs nutritionnelles variables, imprécisions de l'analyse), sur les quantités réelles consommées et sur la valeur exacte des besoins. Le rationnement est en effet la plupart du temps calculé pour un lot d'animaux ou un troupeau, au sein duquel il existe en général une certaine hétérogénéité des performances. Les besoins sont calculés pour une performance moyenne au sein du lot d'animaux ou du troupeau. Pour des vaches laitières en lactation, on calcule ainsi en général des « besoins moyens » en prenant en compte la production laitière moyenne du lot ou du troupeau. Les vaches avec une haute production ont cependant des besoins plus élevés, alors que celles avec une basse production ont des besoins plus faibles. En pratique, pour les vaches traitées, on établit ainsi une « ration de base » à un niveau qui permet de couvrir la production de la plupart des vaches traitées du troupeau. Les vaches ayant une production supérieure recevront en plus de la ration de base un concentré de production.

Pour terminer, mettons les différentes notions vues ci-dessus en application en prenant un exemple simple : soit une ration pour une vache laitière de 650 kg produisant 25 L de lait, contenant 20 kg d'ensilage d'herbe préfané de très bonne qualité, 20 kg d'ensilage de maïs, 2 kg de tourteau de soja et 1 kg d'orge.

Quelles sont les questions que nous devons nous poser ?

1. Quelles sont les apports en KVEM et en DVE de cette ration et quel est son OEB ?
2. Ces apports couvrent-ils les besoins de la vache ?
3. Si ce n'est pas le cas, cette ration pourrait-elle être améliorée ?

Pour répondre à la question 1, nous devons commencer par calculer les apports en MS des différents aliments :

RATION	Teneur en MS (%)	Apports en MS (kg)
20 kg d'ensilage d'herbe préfané de très bonne qualité	45	9
20 kg d'ensilage de maïs	32	6,4
1 kg d'orge	87,4	0,87
2 kg de tourteau de soja	87,9	1,76

Nous pouvons ensuite calculer les apports en KVEM et en DVE et l'OEB de la ration :

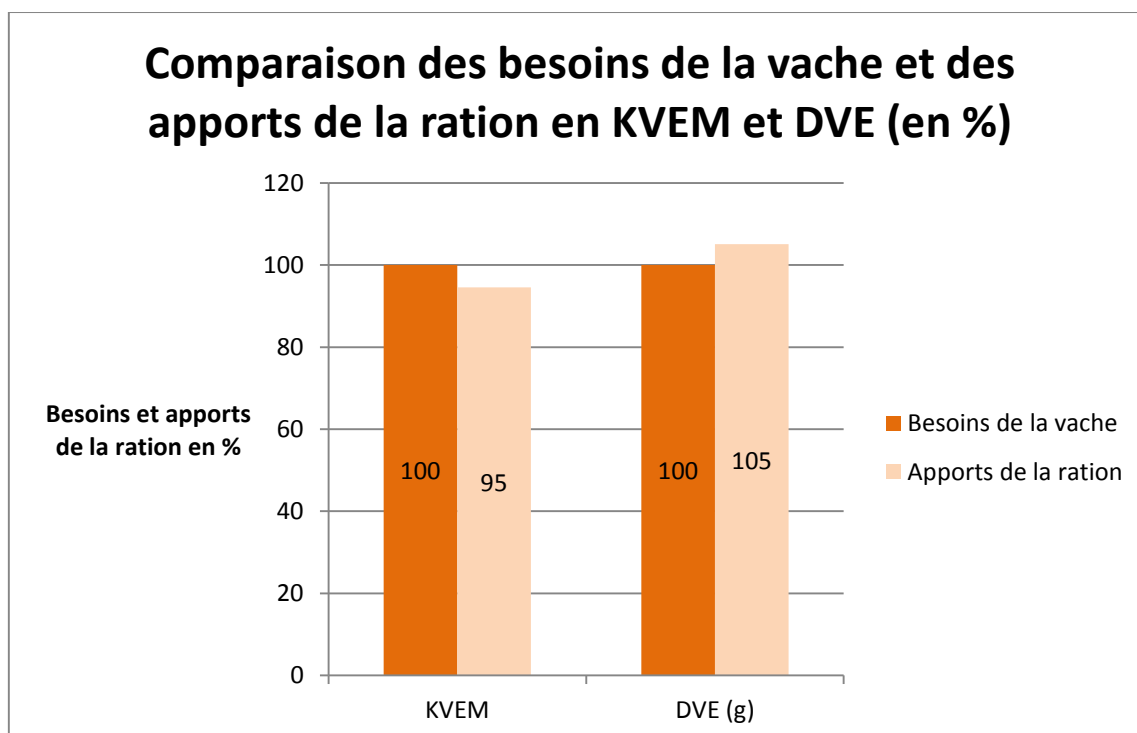
RATION	Teneur en KVEM /kg MS	Apports en KVEM	Teneur en DVE g/kg MS	Apports en DVE (g)	Teneur en OEB g/kg MS	Apports en OEB (g)
9 kg de MS d'ensilage d'herbe	0,81	9 x 0,81 = 7,29	71	9 x 71 = 639	65	9 x 65 = 585

préfané de très bonne qualité						
6,4 kg de MS d'ensilage de maïs	0,89	$6,4 \times 0,89 = 5,70$	49	$6,4 \times 49 = 314$	-19	$6,4 \times (-19) = -122$
0,87 kg de MS d'orge	1,13	$0,87 \times 1,13 = 0,98$	94	$0,87 \times 94 = 82$	-23	$0,87 \times (-23) = -20$
1,76 kg de MS de tourteau de soja	1,13	$1,76 \times 1,13 = 1,99$	261	$1,76 \times 261 = 459$	195	$1,76 \times 195 = 343$
TOTAL		15,96		1494		786

Nous pouvons à présent comparer les apports de la ration avec les besoins de la vache et répondre à la question 2.

Les besoins en énergie de cette vache sont de 16,89 KVEM et ses besoins en DVE sont de 1422 g.

Paramètres de la ration	Besoins de la vache	Apports de la ration	Différence
KVEM	16,89	15,96	-0,93
DVE (g)	1422	1494	+ 72
OEB (g) = 786			



Nous pouvons donc conclure que :

- Les besoins en KVEM de la vache ne sont pas satisfaits, puisqu'il manque 0,93 KVEM. Elle risque donc de maigrir ou de ne pas produire ses 25 L de lait.
- Les besoins en DVE de la vache sont *apparemment* satisfaits — il existe même un léger excès de 72 g de DVE. Mais ce DVE est-il réel ? Pour répondre à cette question, regardons la valeur de l'OEB : 786. L'OEB de la ration étant positif, les protéines exprimées par le DVE sont réelles. Par conséquent, les besoins de la vache en protéines sont effectivement satisfaits. Les protéines nécessaires pour produire 25 L de lait sont donc bel et bien présentes. L'OEB étant cependant très élevé, il existe un excès important d'N au niveau du rumen, qui aura un impact sur la santé de la vache et sur l'environnement.

En conclusion, la ration n'est pas assez riche en énergie pour le niveau de production de la vache et est trop riche en N fermentescible, ce qui va occasionner, pour l'animal, un excès d'urée. Cet excès aura un impact sur la santé de la vache et sur l'environnement, et représente une perte économique pour l'éleveur, d'une part via la perte de production et les frais vétérinaires éventuels liés à l'état de santé de l'animal, et d'autre part, via la non valorisation de l'N incorporé dans la ration.

Enfin, répondons à la question 3 : puisque cette ration n'est pas optimale, voyons comment nous pouvons procéder pour l'améliorer.

Nous sommes face à une ration présentant les déséquilibres suivants :

- Carence modérée en KVEM
- Léger excès de DVE
- Large excès d'OEB

Vu la nécessité d'utiliser et de valoriser les fourrages disponibles dans l'exploitation, nous allons plutôt modifier la nature et les quantités des concentrés distribués. Actuellement, la vache reçoit 1 kg d'orge (1,13 KVEM/kg MS ; 94 g DVE/kg MS ; OEB = -23) et 2 kg de tourteau de soja (1,13 KVEM/kg MS ; 261 g DVE/kg MS ; OEB = 195).

Le tourteau de soja étant riche en DVE et présentant une valeur d'OEB très élevée, il est le principal responsable des déséquilibres rencontrés. Nous allons donc établir une ration sans tourteau de soja. Voyons les apports réalisés si nous supprimons le tourteau de soja, et comparons-les aux besoins :

RATION	Apports en KVEM	Apports en DVE (g)	Apports en OEB (g)
9 kg de MS d'ensilage d'herbe préfané de très bonne qualité	7,29	639	585
6,4 kg de MS d'ensilage de maïs	5,70	314	-122
0,87 kg de MS d'orge	0,98	82	-20
TOTAL	13,97	1035	443

Paramètres de la ration	Besoins de la vache	Apports de la ration	Différence
--------------------------------	----------------------------	-----------------------------	-------------------

KVEM	16,89	13,97	-2,92
DVE (g)	1422	1035	- 387
OEB (g) = 443			

Sans tourteau de soja, la ration est déficitaire en KVEM et en DVE. L'OEB est toujours en excès, mais cet excès est moindre. Nous devons donc compléter la ration à l'aide d'un aliment, qui, idéalement, sera riche en KVEM, moyennement riche en DVE et aura un OEB négatif. Les pulpes séchées ont des caractéristiques nutritionnelles semblables. Ajoutons-les à la ration, à raison de 3,5 kg.

Les pulpes séchées ayant une teneur en MS de 90,2 %, ceci correspond à un apport de 3,2 kg de MS de pulpes séchées. Quels sont les apports en KVEM, DVE et OEB des pulpes séchées ?

Pulpes séchées	Teneur en KVEM /kg MS	Apports en KVEM	Teneur en DVE g/kg MS	Apports en DVE (g)	Teneur en OEB g/kg MS	Apports en OEB (g)
3,2 kg de MS de pulpes séchées	0,96	3,2 x 0,96 = 3,07	111	3,2 x 111 = 355	-67	3,2 x (-67) = -214

Calculons à présent les apports en KVEM et DVE de la ration complète corrigée, et voyons quel est son OEB :

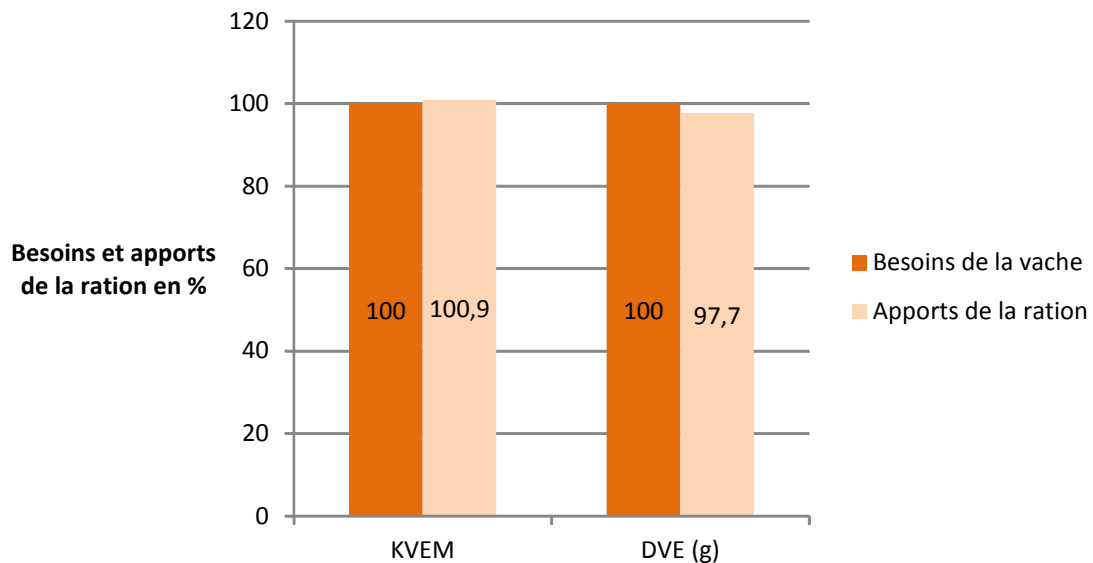
RATION CORRIGEE	Apports en KVEM	Apports en DVE (g)	Apports en OEB (g)
9 kg de MS d'ensilage d'herbe préfané de très bonne qualité	7,29	639	585
6,4 kg de MS d'ensilage de maïs	5,70	314	-122
0,87 kg de MS d'orge	0,98	82	-20
3,2 kg de MS de pulpes séchées	3,07	355	-214
TOTAL	17,04	1390	229

Comparons enfin ces apports aux besoins de la vache :

Paramètres de la ration	Besoins de la vache	Apports de la ration	Différence
KVEM	16,89	17,04	+ 0,15
DVE (g)	1422	1390	- 32
OEB (g) = 229			

Cette ration est-elle plus équilibrée que la précédente ?

Comparaison des besoins de la vache et des apports de la ration en KVEM et DVE (en %)



Oui, car :

- Les besoins en KVEM de la vache sont satisfaits, il existe un très léger excès de 0,15 KVEM.
- Les besoins en DVE de la vache sont quasiment satisfaits — il subsiste un très léger déficit de 32 g de DVE.
- L'OEB de la ration est égale à 229, soit une valeur proche de la limite maximale souhaitable, 200.

En bref

La capacité d'ingestion d'une vache correspond à la quantité d'aliments distribués à volonté qu'elle ingère volontairement. Elle varie beaucoup entre le début de lactation et la fin de celle-ci, et il en va de même pour les besoins énergétiques. En début de lactation, les besoins énergétiques sont très élevés, alors que la capacité d'ingestion est réduite. Les besoins de la vache ne sont donc pas couverts et l'animal doit puiser dans ses réserves corporelles afin de combler le déficit énergétique.

Les quantités d'aliments réellement ingérés par une vache laitière dépendent d'abord de sa capacité d'ingestion. Mais d'autres facteurs influencent le niveau d'ingestion réel : les caractéristiques de la ration distribuée (quantité, qualité et valeur d'encombrement des fourrages) et la stratégie de distribution de la ration (distribution restreinte ou à volonté, facilité d'accès des vaches à la ration). L'ingestion réelle s'exprime toujours en kg de MS/jour. Si la capacité d'ingestion permet de prévoir la ration, la mesure de l'ingestion réelle, permet quant à elle d'évaluer les quantités réellement ingérées et d'ajuster si nécessaire les quantités distribuées.

En Belgique, pour le secteur des productions laitières, on utilise un système hollandais d'unité énergétique : le KVEM.

Les apports et les besoins en matières azotées sont eux aussi exprimés selon un système hollandais, appelé le système DVE/OEB.

— Les DVE désignent les *protéines digestibles dans l'intestin*.

DVE = protéines alimentaires non dégradées + protéines microbiennes – protéines endogènes

Ce système d'unité prend en compte les *protéines microbiennes qui peuvent être théoriquement formées à partir de l'énergie fermentescible*. La valeur DVE suppose donc qu'il y ait suffisamment d'N fermentescible, une situation qui n'est évidemment pas toujours rencontrée dans le rumen de la vache. Il peut donc arriver que la valeur DVE soit en partie constituée par des protéines « virtuelles », s'il existe dans le rumen un excès d'énergie par rapport à l'N fermentescible.

— L'OEB constitue quant à lui *le bilan des protéines dégradables* dans le rumen.

OEB = protéines microbiennes permises par l'N – protéines microbiennes permises par l'Energie

Dans une ration correctement formulée, les apports en DVE correspondent aux besoins en DVE de la vache. Une fois cet équilibre atteint, trois cas de figure sont possibles :

1. L'OEB de la ration est > 0 . Il existe alors un excès d'N fermentescible dans le rumen. Le DVE exprime alors une protéine vraie et les besoins de la vache en DVE sont donc réellement couverts par la ration. L'excès d'N, qui se présente sous la forme de NH_3 , est éliminé par les urines et le lait, après transformation en urée. Un excès important d'N aura des impacts non négligeables sur la santé de la vache. En outre, vu que cet N n'a pas été valorisé par l'animal mais qu'il a néanmoins été incorporé dans la ration, ceci représente une perte économique pour l'éleveur. On considère en général que chez la vache laitière, il est souhaitable de ne pas dépasser un OEB de + 200/jour dans une ration.

2. L'OEB de la ration est < 0 . Il existe un excès d'énergie fermentescible dans le rumen. Une partie du DVE est alors constituée de protéines virtuelles. Les besoins de la vache en DVE ne sont donc pas totalement couverts. Une telle situation doit toujours être évitée chez la vache laitière.
3. L'OEB de la ration est $= 0$. Il y a alors autant d'énergie que d'N fermentescible dans le rumen. Le DVE est réel, les besoins de la vache sont donc couverts par la ration.

Les apports en minéraux des aliments sont exprimés en g/kg de MS d'aliment pour les macro-éléments (Ca, P, K, Na, Cl, S et Mg) et en mg/kg de MS d'aliment ou en ppm pour les oligo-éléments (Fe, Se, Zn, Cu, I, Co, Mn). Les apports en vitamines sont quant à eux exprimés en mg/kg de MS d'aliment ou en UI/kg de MS d'aliment.

Quant aux besoins, s'il s'agit de macro-éléments ou de vitamines, ils sont exprimés en termes de besoins absolus, c'est-à-dire en g/jour (ou parfois en UI pour les vitamines), alors que s'il s'agit d'oligo-éléments, ils sont exprimés en termes de besoins relatifs et font l'objet de recommandations à suivre quant à la teneur à atteindre dans la MS de la ration et sont exprimés en ppm ou en mg/kg de MS ingérée.

Les besoins en eau d'une vache laitière peuvent s'exprimer sur base des litres de lait produits. En moyenne, une vache laitière boit ainsi entre 3 et 4 L d'eau/L de lait collecté. Ces quantités peuvent varier selon le contenu en eau des aliments ingérés, la température extérieure, le gabarit et le statut physiologique de l'animal (génisse, vache en lactation, vache tarie gestante).

Tout animal effectue des dépenses pour son entretien et ses productions. On parle donc de besoins d'entretien et de besoins de production. Lors du calcul de rationnement, il convient de prendre en compte ces différents besoins. Ils sont calculés en utilisant des formules de calcul. Chez la vache laitière, schématiquement, on distingue 2 cas de figure possibles : soit la vache est en lactation, soit elle est tarie et gestante.

Le rationnement consiste à couvrir les besoins de l'animal — besoins énergétiques, azotés, minéraux et vitaminiques — en maximisant la fraction fourragère.

D'un point de vue pratique, il convient d'ajuster au mieux les apports alimentaires aux besoins, en prenant une certaine marge de sécurité. Ces « *apports alimentaires recommandés* » sont donc supérieurs aux besoins. Le rationnement est la plupart du temps calculé pour un lot d'animaux ou un troupeau, au sein duquel il existe une certaine hétérogénéité des performances. Les besoins sont donc calculés pour une performance moyenne au sein du lot d'animaux ou du troupeau.

REFERENCES

- BARONE R. Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 3. Splanchnologie I. 2eme édition. Edition Vigot : Paris, 1984, 879 pages.
- BROCARD V, BRUNTSCHWIG P, LEGARTO J, PACCARD P, ROUILLE B, BASTIEN D, LECLERC M-C. Guide pratique de l'alimentation du troupeau bovin laitier. L'Institut de l'élevage : Paris, 2010, 268 pages.
- BUYSSE FX, DE BRABANDER DL, AERTS JV. Een nieuw netto-energiesysteem voor melkvee in België. Landbouwtijdschrift, 1977, 6, 1437-1462.
- CONSEIL QUEBECOIS DES PLANTES FOURRAGERES. Guide sur la production de foin de commerce [En ligne]. Adresse URL : <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/guide%20foin%20corr.pdf>. Consulté le 20/09/2012.
- CONTE A. Faites la chasse au gaspillage d'eau. Réussir Lait, 2012, 260, 28.
- CONTE A. Enfin des références sur les consommations d'eau des bovins. Réussir Lait, 2012, 260, 29.
- DE BRABANDER D, DE CAMPENEERE S, RYCKAERT I, ANTHONISSEN A. Melkveevoeding [En ligne]. Adresse URL : <http://lv.vlaanderen.be/nlapps/docs/default.asp?id=571>. Consulté le 08/08/2012.
- DROGOUL C, GADOUD R, JOSEPH MM, JUSSIAU R, LISBERNEY MJ, MANGEOL B, MONTMEAS L, TARRIT A. Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 1, 2^{eme} édition. Educagri Editions : Dijon, 2004, 270 pages.
- FAVERDIN P, DELAGARDE R, DELABY L. Préviation de l'ingestion des vaches laitières au cours de la lactation. Rencontres Recherches Ruminants, 2006, 13, 85-88.
- JARRIGE R, RUCKEBUSCH Y, DEMARQUILLY C, FARCE MH, JOURNET M. Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion. INRA Editions : Paris, 1995, 921 pages.
- JOUANY JP. Les fermentations dans le rumen et leur optimisation. INRA Productions Animales, 1994, 7, 207-225.
- KAUFMAN W, HAGEMEISTER H, DIRKSEN G. Adaptation to changes in dietary composition level and frequency of feeding. In : Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants, Y Ruckebusch and P Thivend (eds). MTP Press Ltd : Lancaster, 1980, pp. 587-602.
- MULLER P. Les bases de l'alimentation des ruminants [En ligne]. Dossier documentaire : L'alimentation des animaux. Document 4. Adresse URL : http://assises.educagri.fr/fileadmin/user_upload/pdf_cnpr/09Z3_4.pdf. Consulté le 01/08/2012.
- TAMMINGA S, BRANDSMA GG, DIJKSTRA J, VAN DUINKERKEN G, VAN VUUREN AM, BLOK MC. Protein evaluation for ruminants : the DVE/OEB 2007 system. CVB documentation report nr. 53, 2007.
- VAN DER HONING Y, ALDERMAN G. Livestock resources and feed evaluation in Europe. Present situation and future prospects. III. Ruminants. Livestock Production Science, 1988, 19, 217-278.
- VAN DUINKERKEN G, BLOK MC, BANNINK A, CONE JW, DIJKSTRA J, VAN VUUREN AM, TAMMINGA S. Update of the Dutch protein evaluation system for ruminants : the DVE/OEB₂₀₁₀ system. Journal of Agricultural Science, 2011, 149, 351-367.

VERMOREL M, COULON JB. Alimentation des vaches laitières : comparaison des systèmes d'alimentation énergétique. INRA Productions Animales, 1992, 5, 289-298.

LIENS UTILES

- **Service de Nutrition des Animaux Domestiques, Faculté de Médecine Vétérinaire, Université de Liège**, Boulevard de Colonster 20, B43, 4000 Liège

Personnes de contact : Dr Isabelle Dufrasne (04/366.23.73 ; isabelle.dufrasne@ulg.ac.be)
et Dr Louis Istasse (04/366.41.39 ; listasse@ulg.ac.be)

Compétences : Suivi d'alimentation et des performances dans les exploitations ; résolution de problèmes de santé liés à l'alimentation ; expertise en valorisation des pâturages pour les vaches laitières (y compris avec traite robotisée) et allaitante, rejets dans l'environnement.

- **Fourrages Mieux ASBL**, Rue du Carmel 1, 6900 Marloie

Site internet : www.fourragesmieux.be

Personne de contact : David Knoden (061/210.833 ; 0473/53.64.95 ; knoden@fourragesmieux.be)

Compétences : Conseils en production fourragère des semis à la récolte (prairies, céréales immatures, betteraves fourragères) ; recommandation des variétés et des mélanges de graminées et de légumineuses ; visites en ferme.

- **Centre Wallon de Recherches Agronomiques, Département 'Productions et Filières'**, Rue de Liroux 8, 5030 Gembloux

Eric Froidmont (081/62.67.74 ; froidmont@cra.wallonie.be),

Compétences : Alimentation et croissance du jeune bétail laitier, Autonomie protéique des élevages, Alimentation des bovins laitiers et émissions de gaz à effet de serre, Alimentation et qualité nutritionnelle du lait

Amélie Turlot (081/62.69.97 ; turlot@cra.wallonie.be)

Compétences : Coût de l'alimentation selon le mode de production, Temps de travail

Virginie Decruyenaere (decruyenaere@cra.wallonie.be)

Compétences : Valeur nutritionnelle des fourrages

- **Ingénierie des productions animales et nutrition, Département des Sciences agronomiques, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège**, 2, Passage des Déportés, B- 5030 Gembloux

Personne de contact : Dr. Ir. Yves Beckers (+32 (0)81 62 21 19 ; yves.beckers@ulg.ac.be)

Compétences : Alimentation et nutrition des ruminants, systèmes de productions animales, élevage - environnement