
INFLUENCE DE LA FIBROSITE DE LA RATION DANS LA PREVENTION DE L'ACIDOSE CHEZ LA VACHE LAITIERE

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement en 2002
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Sébastien, Nicolas MARTIN

Né, le 29 avril 1976 à MANTES-LA-JOLIE (Yvelines)

Directeur de thèse : **M. le Professeur Francis ENJALBERT**

JURY

PRESIDENT :

M. Henri DABERNAT

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :

M. Francis ENJALBERT

M. Paul CABANIE

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

Directeur par intérim	: M.	G. BONNES
Directeurs honoraires.....	: M.	R. FLORIO
	M.	R. LAUTIE
	M.	J. FERNEY
	M.	G. VAN HAVERBEKE
Professeurs honoraires.....	: M.	A. BRIZARD
	M.	L. FALIU
	M.	C. LABIE
	M.	C. PAVAUX
	M.	F. LESCURE
	M.	A. RICO

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **CABANIE Paul**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **CHANTAL Jean**, *Pathologie infectieuse*
- M. **DARRE Roland**, *Productions animales*
- M. **DORCHIES Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **GUELFY Jean-François**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*
- M. **BODIN ROZAT DE MANDRES NEGRE Guy**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **BRAUN Jean-Pierre**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **EECKHOUTTE Michel**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
- M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **MARTINEAU Guy**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*
- M. **MILON Alain**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*
- M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*
- M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, *Physiologie et Thérapeutique*

PROFESSEURS 2^e CLASSE

- Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
- M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les industries agro-alimentaires*
- M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **KOLF-CLAUW Martine**, *Pharmacie -Toxicologie*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*
- M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

PROFESSEUR ASSOCIE

- M. **TAMZALI Youssef**, *Clinique équine*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

MAITRES DE CONFERENCES 1^{ère} CLASSE

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
Mme **BOUCAUT-BARALON Corine**, *Pathologie infectieuse*
Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
Mme **BRET-BENNIS Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
Mlle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. **DUCOS Alain**, *Zootechne*
M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **MESSUD-PETIT Frédérique**, *Pathologie infectieuse*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
Mme **RAYMOND-LETRON Isabelle**, *Anatomie pathologique*
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
Mlle **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*
M. **VALARCHER Jean-François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

MAITRES DE CONFERENCES 2^e CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
Mlle **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie du Bétail*
Mlle **HAY Magali**, *Zootechne*
M. **MARENDA Marc**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Productions animales*
M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
Mme **MEYNADIER-TROEGELER Annabelle**, *Alimentation*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
M. **MONNEREAU Laurent**, *Anatomie, Embryologie*

A notre jury de thèse

Monsieur le Professeur DABERNAT Henri
Professeur des Universités
Praticien hospitalier
Microbiologie - Virologie

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse.

Hommage respectueux.

Monsieur le Professeur ENJALBERT Francis
Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Alimentation

Qui a accepté avec bienveillance notre sujet de thèse, en remerciement de son soutien et de ses précieux conseils.

Qu'il trouve ici l'expression de notre vive gratitude et de notre profond respect.

Monsieur le Professeur CABANIE Paul
Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Histologie – Anatomie pathologique.

Qui nous a fait l'honneur d'examiner ce travail.

Hommage respectueux.

A mon Papa et ma Maman, pour leur soutien inestimable, leur patience et leur confiance...

A mon frère Sylvain, Estelle et Lucas,

A toute ma famille et à la mémoire de mes grands-mères,

A Aélis pour sa présence réconfortante, sa tendresse et son amour au quotidien,

A SMR, Minidoune et Lolo, pour les moments partagés avec Blondin depuis si longtemps déjà

Merci à tous...

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	12
PARTIE I : LA DIGESTION RUMINALE : PHYSIOLOGIE ET TROUBLES.	13
I.1. RAPPELS PHYSIOLOGIQUES	13
<i>I.1.1. Le rumen et sa composition.....</i>	<i>13</i>
<i>I.1.2. Modalités biochimiques de la digestion ruminale.....</i>	<i>15</i>
I.1.2.1. Digestion des glucides	15
I.1.2.2. Digestion des protides.....	17
I.1.2.3. Digestion des lipides.....	18
I.2. DÉVIATION DU MÉTABOLISME DIGESTIF VERS L'ACIDOSE.	18
<i>I.2.1. Définition.....</i>	<i>18</i>
<i>I.2.2. Étiologie de l'acidose.....</i>	<i>18</i>
<i>I.2.3. Manifestations principales de l'état d'acidose.....</i>	<i>19</i>
I.2.3.1. Perturbation de la fonction ruminale	19
I.2.3.2. Baisse du taux butyreux.....	20
I.2.3.3. Troubles de l'appétit	20
I.2.3.4. Autres manifestations pathologiques	20
PARTIE II : LE CONCEPT DE FIBROSITÉ DES ALIMENTS ET DES RATIONS.....	21
II. 1. ORIGINE ET JUSTIFICATION DU CONCEPT DE FIBROSITÉ.	21
<i>II. 1. 1. Nécessité de distribuer des rations fortement énergétiques.....</i>	<i>21</i>
<i>II. 1. 2. Définition de la fibrosité.</i>	<i>21</i>
<i>II.1.3. Signification physiologique de la fibrosité.....</i>	<i>22</i>
II.1.3.1. Fibrosité et contractions ruminales.....	22
II.1.3.2. Fibrosité et sécrétion salivaire.....	24
II. 2. FACTEURS DE VARIATION DE LA FIBROSITÉ.	27

<i>II.2.1. Facteurs de variation intrinsèques aux aliments.</i>	27
II.2.1.1. La taille des particules.	27
II.2.1.2. Teneur en fibres de la ration.	31
II.2.1.3. Influence du type d'aliment.	36
II.2.1.4. Influence du niveau d'apport de concentrés.	38
II.2.1.5. Qualité de la coupe des particules de la ration.	39
II.2.1.6. Influence de la teneur en protéines de la ration.	39
<i>II.2.2. Facteurs de variation relatifs aux animaux.</i>	40
II.2.2.1 Variation individuelle de la durée de mastication.	40
II.2.2.2 Effet du niveau d'ingestion	41
<i>II.2.3. Variations selon le temps d'accès à la nourriture.</i>	42

PARTIE III : LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES ET RECOMMANDATIONS DE FIBROSITÉ

UTILISÉS.	44
III.1. LE SYSTÈME DE BALCH 1971 (9).....	44
III.2. SUDWEEKS 1981.....	45
III.3. SANTINI 1983.....	48
III.4. LE SYSTÈME DANOIS DE NORGAARD.....	49
III.5. LE SYSTÈME RVU DE MERTENS.	51
III.6. LE SYSTÈME PENDF	52
III.7. LE SYSTÈME DE VALEURS DE STRUCTURE DE DE BRABANDER	53
III.8. LES RECOMMANDATIONS ITCF (INSTITUT TECHNIQUE DES CONCENTRÉS ET FOURRAGES) (42)	57
CONCLUSION	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.	60

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1. DIGESTION RUMINALE DES GLUCIDES : ASPECTS BIOCHIMIQUES.....	16
FIGURE2 : CYCLE MOTEUR DU RÉTICULO-RUMEN. D'APRÈS (53).....	23
TABLEAU 1 : COMPOSITION DE LA SALIVE DES BOVINS. D'APRÈS (7).....	25
TABLEAU 2: PRODUCTION SALIVAIRE DE VACHES LAITIÈRES ESTIMÉE PAR LES TEMPS JOURNALIERS D'INGESTION, DE RUMINATION ET DE REPOS. D'APRÈS (11).	26
TABLEAU 3 : INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES DU FOURRAGE SUR LA MASTICATION DE LA RATION. D'APRÈS (68).....	28
TABLEAU 4 : INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES DU FOURRAGE SUR LA MASTICATION DE LA RATION. D'APRÈS (80).....	29
TABLEAU 5: INFLUENCE DE LA TENEUR EN NDF DE LA RATION SUR L'ACTIVITÉ MASTICATOIRE. D'APRÈS (12).....	32
TABLEAU 6: EFFET DU TYPE D'ALIMENT SUR LA PRODUCTION SALIVAIRE. D'APRÈS (5).	36
TABLEAU 7 : EFFET DE LA SOURCE DE FOURRAGE ET DE LA TAILLE DES PARTICULES SUR LA PRODUCTION DE SALIVE, D'APRÈS (11).....	38
TABLEAU 8 : RÉSULTATS DES MESURES DE FIBROSITÉ DE QUELQUES ALIMENTS SELON BALCH (9)	45
TABLEAU 9 : LES VALEURS DE FIBROSITÉ DES ALIMENTS SELON SUDWEEKS ET AL. (71)	46
TABLEAU 10 : PRINCIPES DU SYSTÈME DANOIS D'INDICE DE FIBROSITÉ. D'APRÈS NORGAARD (57).....	50
TABLEAU 11 : VALEURS DE STRUCTURE DE QUELQUES ALIMENTS COURAMMENT UTILISÉS. D'APRÈS (26).....	55
TABLEAU 12 : LES RECOMMANDATIONS ITCF POUR L'ENSILAGE DE MAÏS. D'APRÈS (42).....	57

INTRODUCTION

L'évolution de l'élevage laitier depuis une trentaine d'années a conduit à beaucoup de changements dans la pratique courante, tant sur le plan de la nutrition que sur le plan de la gestion des animaux. L'apparition des quotas laitiers par exemple, a conduit à un accroissement des niveaux individuels de production : l'éleveur doit produire plus de lait avec moins de vaches. Les animaux sont de plus en plus sollicités, la sélection génétique est maintenant devenue incontournable, mais elle permet seulement une augmentation des potentiels de l'animal. L'exigence des animaux quant à leur alimentation n'a cessé d'augmenter depuis, et toute erreur de rationnement est immédiatement ressentie par l'éleveur : les vaches doivent manger de grosses quantités d'aliment de très bonne qualité. Pour satisfaire les besoins énormes en énergie de ces animaux (la production laitière étant très grosse consommatrice d'énergie), les rations ont évolué : augmentation des quantités d'aliment concentré, broyage ou hachage des fourrages.

Face à ces modifications nutritionnelles, l'élevage se trouve à la limite des désordres alimentaires, dont l'acidose, la parakératose du rumen. Dès que survient une affection des estomacs, l'éleveur se trouve confronté à une situation qui peut rapidement devenir catastrophique puisque les animaux diminuent systématiquement leur production, et la récupération peut être longue.

Des travaux sur les nouvelles modalités d'alimentation se sont développés depuis plus de quarante ans, et des notions nouvelles comme la fibrosité sont apparues. La fibrosité est considérée comme étant une caractéristique de l'aliment permettant par divers mécanismes le maintien d'un bon fonctionnement ruminal, garant d'une bonne protection contre les désordres digestifs.

Dans ce travail, après une première partie de rappels sur le fonctionnement normal et pathologique du rumen (le phénomène d'acidose sera présenté succinctement), le concept de fibrosité sera abordé : définitions et facteurs de variation seront successivement envisagés. Enfin, une dernière partie tentera de faire le tour des principales recherches effectuées jusqu'à aujourd'hui pour proposer différents systèmes de modélisation de la fibrosité.

Partie I : La digestion ruminale : physiologie et troubles.

I.1. Rappels physiologiques

La digestion chez les ruminants est dominée par l'importance des phénomènes microbiens qui se déroulent dans les deux premiers réservoirs gastriques. La digestion microbienne s'effectue dans les pré-estomacs, essentiellement dans le rumen : une intense activité biochimique est réalisée par ces micro-organismes, qui utilisent pour eux-mêmes les aliments ingérés par le ruminant, et qui laissent diffuser les résidus de leur métabolisme qui sont alors récupérés par l'hôte. Ces micro-organismes sont également utilisés en l'état par l'hôte, qui les digère après leur mort, et récupère ainsi les matières organiques qui les composent.

Cette digestion ruminale est très importante comme le montrent les valeurs moyennes suivantes qui représentent le pourcentage d'éléments dégradés dans le réticulo-rumen par rapport aux éléments digestibles totaux (66) :

- Glucides solubles : 100 %
- Amidons à dégradation rapide (orge, blé) : 100 %
- Amidons à dégradation lente (maïs, sorgho) : 50 à 80 %
- Composés pariétaux : 90 % à 100 %
- Matières azotées : 66 %

1.1.1. Le rumen et sa composition

Le rumen est un énorme sac fermentaire (150 – 200 l chez les bovins adultes) maintenu dans un état d'anaérobiose. L'unité physiologique constituée par le rumen et le réseau contient après un repas 70 à 75 % de la matière sèche de l'ensemble du tube digestif.

En moyenne, on dénombre 10^{10} bactéries et 10^6 protozoaires par millilitre de liquide ruminal. On peut dénombrer deux cents espèces de bactéries différentes, mais on les classe en deux groupes distincts : les bactéries cellulolytiques (des bactéries Gram -) qui sont adaptées à la digestion des glucides pariétaux et les bactéries amylolytiques (des bactéries Gram +) qui sont adaptées à la digestion des amidons. On peut aussi noter la présence de champignons, qui semble-t-il, jouent un rôle plutôt secondaire.

Le régime alimentaire va déterminer le nombre et la nature des micro-organismes : en effet, selon la quantité et la nature des éléments fermentescibles apportés, et selon les caractéristiques physico-chimiques du milieu créées par ce régime, la micropopulation peut changer radicalement. On constate alors qu'un aliment riche en fourrages va favoriser le développement de la flore cellulolytique (par apport de son substrat spécifique), alors qu'un aliment riche en céréales (ou tout autre concentré) va favoriser la flore amylolytique. Les variations de composition causées par les caractéristiques physico-chimiques du milieu sont surtout imputables au pH : les pH optimaux de croissance sont différents pour les deux types de bactéries : les bactéries cellulolytiques prédominent à un pH plutôt élevé (supérieur à 6), alors que pour les bactéries amylolytiques, le pH optimal se situe au-dessous de 6. Quantitativement, les fluctuations de la micropopulation sont corrélées à l'apport alimentaire : pendant la phase postprandiale, la population est maximale, puis elle décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du moment où le repas a été distribué. Brugère-Picoux (15) précise qu'une privation de nourriture de 4 à 5 jours est suivie d'une disparition quasi-totale des protozoaires et d'une réduction sévère du nombre des bactéries dans le rumen.

Il paraît important de donner quelques précisions sur les caractéristiques physiques et chimiques du rumen :

- La température : elle se situe dans une fourchette allant de 39,5 à 40° C, c'est-à-dire plus élevée que la température centrale du bovin, du fait du dégagement de chaleur produit par les fermentations ruminales.

- La teneur en eau est importante, elle évolue entre 75 et 85 % selon le régime alimentaire. L'abreuvement, et l'apport salivaire sont les deux sources principales de liquide.

- Le pH varie entre 5,5 et 7,3 malgré la production d'acides gras volatils au cours de la digestion (cf. I.1.2.1. Digestion des glucides). Les variations sont limitées par plusieurs mécanismes :

- Les substances alcalines (bicarbonates surtout, également phosphates) apportées par la salive permettent de lutter efficacement contre les molécules d'acide produites. On peut préciser qu'un bovin adulte sécrète de 100 à 200 litres de salive par jour ayant un pH de 8 à 8,5 (cf. II.1.3.2. Fibrosité et sécrétion salivaire) :
- l'absorption locale des acides gras volatils produits pendant la digestion est accrue lorsque leur concentration ruminale augmente (27;45;78).

1.1.2. Modalités biochimiques de la digestion ruminale.

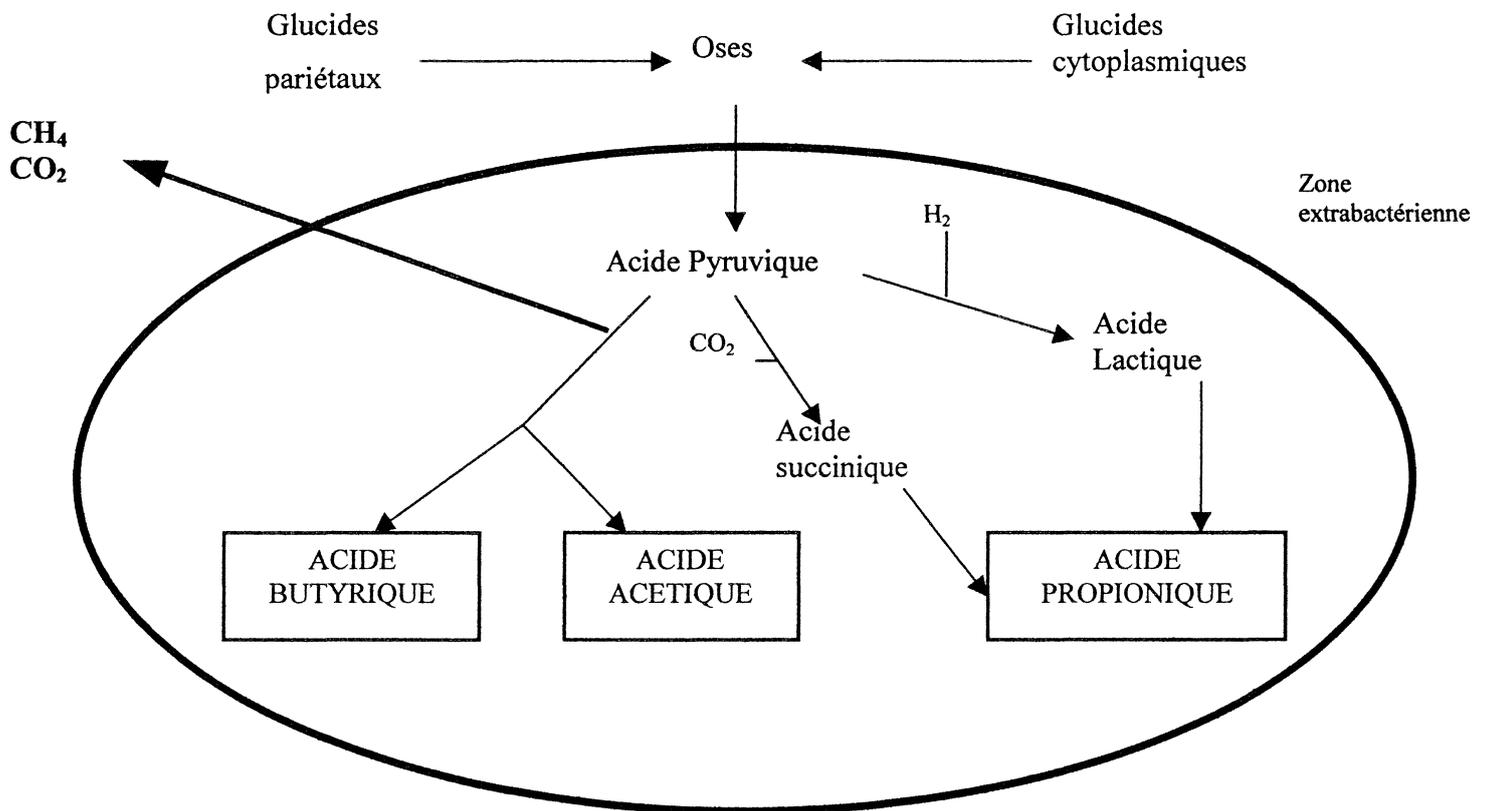
Le bovin ne digère pas ce qu'il ingère, puisque ce sont les bactéries qui interviennent et dégradent les aliments. Ceci explique que la qualité des substances alimentaires a relativement moins d'importance chez les ruminants que chez les monogastriques. Ainsi, le bovin bénéficie des micro-organismes eux-mêmes (qui sont digérés dans la caillette et l'intestin) et des produits du métabolisme bactérien. Certains de ces produits (comme les acides gras volatils) sont utilisables pour l'animal, mais d'autres ne le sont pas, comme les gaz de fermentation (200 à 650 litres par jour).

1.1.2.1. Digestion des glucides

Les bactéries peuvent dégrader à peu près tous les glucides avec une efficacité variable. Au niveau bactérien, la digestion des glucides se divise en deux phases, une extrabactérienne qui correspond à la phase enzymatique permettant d'aboutir à des oses simples, et une phase intrabactérienne qui aboutit à la formation d'acides gras aliphatiques à courte chaîne appelés acides gras volatils. Les principaux A.G.V. (acides gras volatils) rencontrés sont l'acide acétique (C2), l'acide propionique (C3) et l'acide butyrique (C4). Comme illustré dans la figure 1, les A.G.V. sont produits par deux voies métaboliques différentes :

- C2 et C4 avec perte importante de gaz carbonique (CO₂) et de méthane (CH₄).
- C3 selon deux voies biochimiques différentes : la voie succinique qui consomme du CO₂ et la voie acrylique qui consomme du H₂ et dont l'intermédiaire est l'acide lactique.

Dans des conditions optimales de fonctionnement ruminal, le rapport C2/C3 pour une vache laitière doit se situer entre 2,5 et 3.



(D'après N. Priymenko, cours alimentation ENVT 1997)

Figure 1. Digestion ruminale des glucides : Aspects biochimiques.

Nous allons présenter la digestion des glucides en deux étapes : premièrement la digestion des glucides cytoplasmiques (les sucres solubles et l'amidon) et les constituants pariétaux.

- Constituants cytoplasmiques :

Dans les conditions courantes de l'alimentation des bovins, les sucres solubles ne représentent qu'une faible proportion de l'aliment : les fourrages verts par exemple contiennent des sucres (glucose, fructose et saccharose essentiellement) à raison de 3 à 8 % de la matière sèche. Cependant, certains ingrédients peuvent en contenir davantage comme par exemple la betterave (66 % de saccharose).

L'amidon est un polymère glucidique dont l'hydrolyse par les enzymes des bactéries amylolytiques produit des sucres solubles qui sont utilisés par les bactéries pour produire des A.G.V. (essentiellement du C3), avec comme intermédiaire possible l'acide lactique. Tous les

amidons n'ayant pas le même degré de polymérisation, il en résulte une variabilité dans la vitesse de dégradation : l'amidon des céréales immatures, étant faiblement polymérisé, est rapidement dégradé (de l'ordre de 100 % par heure). La vitesse de dégradation de la fraction amidon de l'ensilage de maïs diminue avec l'avancement de la maturité de la plante. Il faut préciser que les fractions d'amidon non digérées dans le rumen le sont en général au niveau de l'intestin grêle et du gros intestin.

- Constituants pariétaux :

Les parois cellulaires des végétaux sont constituées de nombreux polymères glucidiques, tels que les substances pectiques, les hémicelluloses et la cellulose. L'attaque par les bactéries cellulolytiques du rumen (par des enzymes du type cellulase) conduisent à la formation d'un produit appelé le cellobiose, un dimère de glucose qui est un sucre soluble. La poursuite de la digestion est donc la fermentation intrabactérienne des sucres solubles avec production d'A.G.V.

I.1.2.2. Digestion des protides.

Comme pour ce qui se passe avec les glucides, les protides sont dégradés en deux étapes successives : une première étape d'hydrolyse qui aboutit à la libération d'acides aminés, suivie d'une étape de désamination qui conduit, à partir de ces acides aminés, à la libération d'ammoniac et à la production de radicaux ternaires, hydrocarbonés. Il faut préciser que toutes les protéines ne seront pas dégradées en totalité dans le rumen, la solubilité là aussi étant un facteur majeur de différences : une protéine soluble sera bien attaquée dans le rumen par les bactéries, alors qu'une protéine peu soluble (ou protégée par des traitements comme le tannage dans le formol) sera retrouvée en grande quantité dans l'intestin.

Les micro-organismes réalisent la synthèse de leur propre matériel azoté, à partir des matériaux présents dans le milieu, l'ammoniac essentiellement, mais aussi les acides aminés et les acides gras volatils. L'ammoniac présent dans le rumen ne provient pas uniquement des protéines de la ration, mais une partie est constituée de la fraction azotée non protéique de la ration, (A.N.P.), ainsi que par l'urée contenue dans la salive.

I.1.2.3. Digestion des lipides.

Cette digestion fait intervenir des enzymes bactériennes. Les lipides ingérés sont hydrolysés par les lipases bactériennes, ce qui conduit à la libération d'Acides Gras, saturés ou insaturés selon la source de lipides. Les acides gras insaturés sont hydrogénés, seuls quelques acides gras insaturés sont utilisés en l'état par les bactéries pour la constitution de leurs propres membranes (lipides structuraux). Ensuite ces acides gras saturés quittent le rumen et gagnent les portions inférieures du tube digestif.

I.2. Déviation du métabolisme digestif vers l'acidose.

I.2.1. Définition

Plusieurs définitions de l'acidose sont données dans la littérature. Le schéma général peut être envisagé ainsi : à l'intérieur du rumen, on assiste à une déviation brutale des fermentations (34), dont l'origine est une inadaptation de la flore à la ration (32;78). Ceci conduit alors à une production et surtout à une accumulation de facteurs toxiques, non physiologiques, dont le plus important est l'acide lactique (14). La conséquence directe est un abaissement du pH ruminal (60). On peut ensuite préciser cette définition en faisant intervenir le terme d'aigu ou au contraire de chronique (34). Dans le cas d'une acidose aiguë, la chute de pH est brutale, la valeur de pH ruminal devient inférieure à 5,5 ; dans le cas (plus courant en élevage laitier) d'une acidose chronique, le pH est inférieur à 6, et l'affection correspond davantage à une erreur de rationnement (34;67). On ne trouve pas dans l'acidose chronique le caractère d'urgence qui accompagne toujours l'acidose aiguë.

I.2.2. Étiologie de l'acidose

Comme indiqué dans la définition, l'acidose fait suite à un changement dans la nature de la ration distribuée : un excès de glucides rapidement fermentescibles, tels que l'amidon. Un changement brutal de régime peut aussi surtout en début de lactation (dans les deux ou trois premières semaines) engendrer une acidose (78). Enfin, un troisième point est cité dans la majorité des publications (15;32;34;60;78) : il s'agit du défaut de particules. Ce point sera développé plus en détail dans les chapitres suivants.

1.2.3. Manifestations principales de l'état d'acidose

1.2.3.1. Perturbation de la fonction ruminale

Au niveau du rumen, l'acidose se traduit par un abaissement du pH de la phase liquide. Cette modification physico-chimique va avoir plusieurs conséquences. La micropopulation va se trouver modifiée par le changement de l'environnement. On remarque en effet une disparition quasi complète des protozoaires ainsi qu'une nette diminution des bactéries Gram - (15). En revanche, une population de *Streptococcus bovis* va se développer, qui a la particularité de produire de l'acide lactique (74). Ceci va de pair avec la diminution de l'efficacité alimentaire : en premier lieu à cause de la disparition des bactéries cellulolytiques, la digestibilité des parois cellulaires est nettement affaiblie puisque la cellulolyse est complètement inhibée à une valeur de pH inférieure à 6. La valeur énergétique des aliments est donc fortement diminuée (2).

L'acidose conduit également à une réduction des contractions ruminales, avec pour conséquence directe une chute du taux de renouvellement du contenu ruminal. La motricité est en fait inhibée par des concentrations élevées en acide propionique et butyrique. Selon Huber (41), cette inhibition n'est pas directement causée par la présence d'ions hydrogène dans la phase liquide, mais serait liée à un contrôle nerveux central déclenché par l'absorption des acides gras volatils ou des toxines bactériennes produites in situ. En outre, les faibles valeurs de pH contribuent à affaiblir l'épithélium ruminal (perte des villosités, amincissement de la paroi) ce qui à terme conduit à des lésions de parakératose et de ruminite (32).

Ce phénomène d'acidose s'auto-amplifie pour essentiellement deux raisons :

- L'acide lactique s'accumule dans le rumen, car la chute du pH du liquide ruminal entraîne une diminution du pH intracellulaire pour les micro-organismes, ce qui inhibe les enzymes des réactions fermentaires permettant la formation de C2 et de C4 avec libération de CO₂ et de CH₄ (45).

- Le pKa de l'acide lactique est plus faible que les acides produits dans des conditions normales (70) : il est de 3,7 contre 4,75 pour l'acide acétique, 4,81 pour l'acide butyrique, et 4,87 pour l'acide propionique.

L'acidose conduit également à une modification des proportions des A.G.V. En effet, le rapport C2/C3 a tendance à diminuer : premièrement du fait de l'augmentation de la production de C3 car l'accroissement de la concentration de protons est un stimulant de la voie acrylique, et deuxièmement du fait de la diminution de la production de C2. En effet, la diminution de pH est un facteur de réduction de l'attachement bactérien aux substrats. Shriver

et al. (69) ont démontré (in vitro) que la transition de pH de 6,2-7 à 5,8 entraînait une baisse de l'attachement de 43 % accompagnée d'une baisse de la digestibilité de la cellulose de 32,5 à 8,1 %, d'où une diminution de la production de C2.

I.2.3.2. Baisse du taux butyreux

La matière grasse du lait est synthétisée à partir de plusieurs précurseurs : l'acide acétique, le bêta hydroxybutyrate, et les triglycérides sanguins. Or dans la situation pathologique de l'acidose, l'acide propionique est prédominant par rapport à l'acide acétique. Ce dernier devient donc le facteur limitant du taux butyreux (13)

I.2.3.3. Troubles de l'appétit

L'acidose chronique entraîne également une baisse et une irrégularité de l'ingestion par les ruminants (67). L'appétit devient insuffisant, capricieux, on peut noter des variations significatives d'un jour sur l'autre, avec des refus sélectifs : les animaux auront tendance à délaisser les ensilages et les aliments concentrés (78). Ceci peut entraîner une certaine irrégularité dans les fermentations, d'autant plus marquées que la ration contient de l'amidon et que le rapport C2/C3 est faible (2:56).

I.2.3.4. Autres manifestations pathologiques

D'autres manifestations pathologiques sont connues lors d'acidose, ayant toutes pour origine une modification du contenu ruminal ou une production de substances toxiques (Histamine, Tyramine, endotoxines bactériennes). Ces pathologies très variées (fourbures, affections cardiaque, hépatique ou rénale) ne seront pas abordées ici.

Partie II : Le concept de fibrosité des aliments et des rations.

Dans cette partie nous aborderons les caractéristiques générales de la fibrosité, telles que sa définition, ou tout du moins le choix d'une définition parmi celles proposées dans la littérature. Le but de cette partie est également de clarifier les facteurs de variation de ce paramètre, puis nous évoquerons les modalités physiologiques qui font intervenir la fibrosité dans la prévention de l'acidose.

II. 1. Origine et justification du concept de fibrosité.

II. 1. 1. Nécessité de distribuer des rations fortement énergétiques.

Les recherches sur la fibrosité ont maintenant plus de trente ans. En effet, l'augmentation incessante des potentiels de production laitière a conduit à modifier les rations des vaches laitières. Il faut donc fournir une énorme quantité d'énergie afin de permettre la couverture des besoins qui se trouvent exacerbés par cette production. Ceci implique de distribuer des grosses quantités d'aliments concentrés, avec comme première conséquence la diminution de la proportion d'aliments de type fourrage dans la ration. Cet accroissement nécessaire de concentrés se traduit dans le rumen par un apport accru de matière organique fermentescible, avec une déviation des fermentations vers la formation d'acide propionique. Comme indiqué dans la première partie, l'animal ainsi nourri est surexposé au risque d'acidose. La nécessité de fournir une ration plus énergétique et de maximiser l'ingestion conduit aussi à distribuer des fourrages plus jeunes ou à distribuer des fourrages hachés.

II. 1. 2. Définition de la fibrosité.

Plusieurs publications (13;32;70;74;75) soulignent la nécessité de conserver une quantité suffisante de fourrages pour assurer le bon fonctionnement ruminal. Il s'agit en fait plus d'un problème de texture du fourrage que de quantité. En effet, une notion quoiqu'un peu floue au

départ a été envisagée pour caractériser les fourrages : il s'agit de la fibrosité. Par fibrosité on entendait alors la propension d'un aliment à assurer certaines activités nécessaires au bon fonctionnement ruminal. Campling et Freer (17;35) ont été parmi les premiers à relier les différents aliments d'une ration à des paramètres mécaniques du rumen comme par exemple la contractilité.

Ensuite, Balch (9) a proposé d'évaluer les propriétés physiques des aliments à l'aide du temps de mastication de ces aliments. Ceci nous amène donc à définir la fibrosité d'un aliment comme étant le temps de mastication total (pendant l'ingestion et la rumination) ramené au kg de Matière Sèche (MS). La fibrosité de la ration dépend de celle des aliments.

II.1.3. Signification physiologique de la fibrosité.

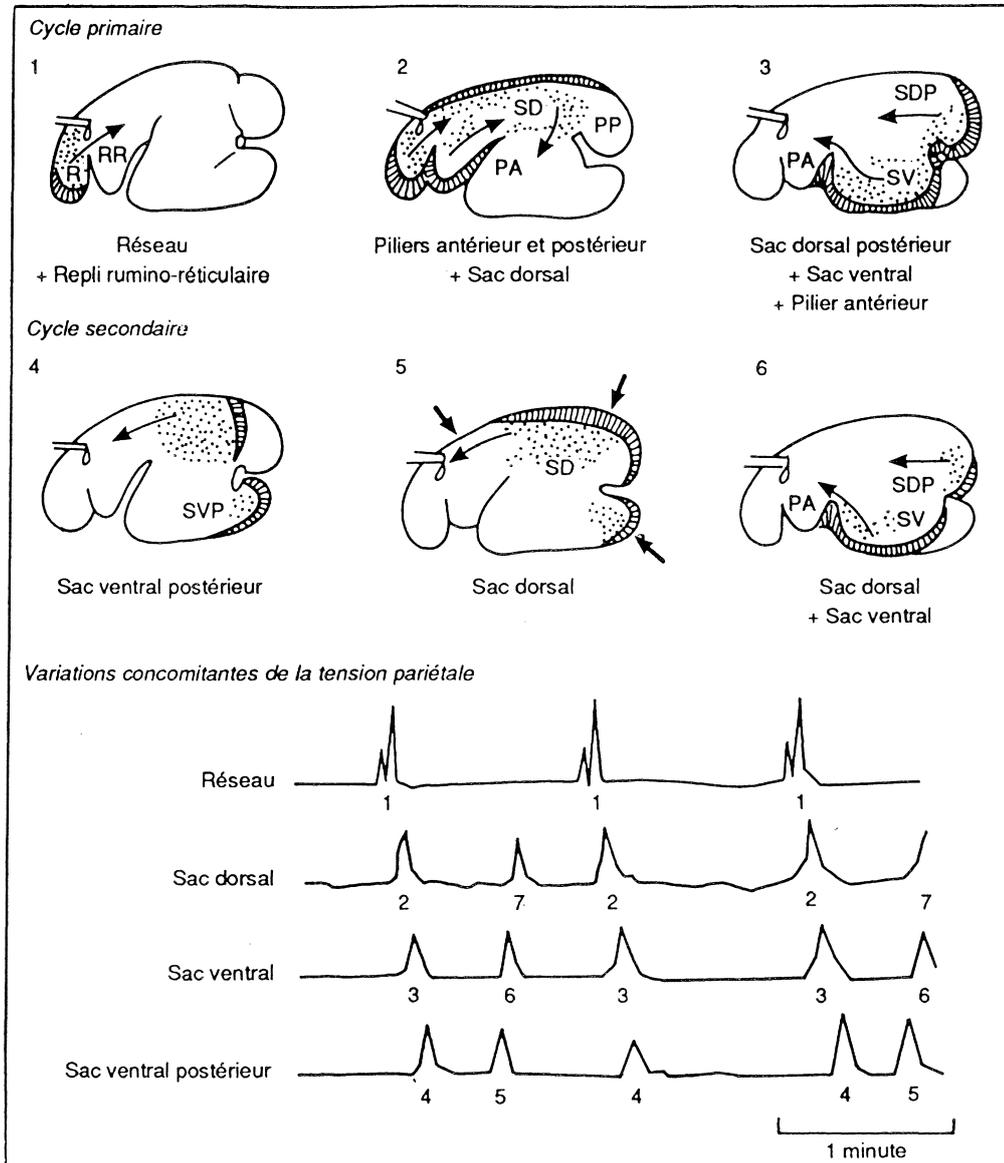
Depuis les travaux de Balch (9), la fibrosité est considérée comme un critère hygiénique des rations (44) dont il faut tenir compte au même titre que la couverture des besoins. En effet, la fibrosité ainsi définie est un paramètre permettant de lutter contre les variations du pH ruminal. L'idée originale est la suivante (9;63;76): la mastication stimule la salivation des animaux. Il est bien connu que la salive des ruminants contient de nombreuses substances tampon, telles que les bicarbonates. Ainsi, une salivation plus importante fournit plus de bicarbonates au rumen, et permet donc une lutte efficace contre la baisse excessive de pH associée à l'acidose. La fibrosité se conçoit donc tout à fait comme un paramètre de lutte contre les désordres fermentaires du rumen. On peut donc dire que depuis une trentaine d'années, plusieurs équipes de recherche dans le monde ont travaillé sur le lien entre la fibrosité et la prévention de l'acidose, l'objectif étant en fait de pouvoir proposer des équations de rationnement qui incorporent ce critère au même titre que le critère de couverture des besoins en nutriments. Il s'agit dans le cas présent d'une couverture des besoins en structure.

II.1.3.1. Fibrosité et contractions ruminales.

Plusieurs caractéristiques physiologiques sont reliées à la fibrosité : en premier lieu les contractions ruminales : Campling et Freer (17;35) ainsi que Ruckebusch (62) ont démontré une baisse des contractions ruminales avec la baisse du temps de mastication, autrement dit avec une baisse de fibrosité.

Rappelons que la paroi du réticulo-rumen dans l'espèce bovine se contracte de façon cyclique toutes les minutes environ durant 20 à 30 secondes. Deux modalités contractiles coexistent

selon que les contractions débutent au niveau du réseau (cycles primaires) ou au niveau du sac ventral postérieur du rumen (cycles secondaires). Le déroulement des contractions ruminales est illustré par la figure 2.



R= Réseau ; RR= Repli rumino-réticulaire ; SD= Sac Dorsal ; PA, PP = Piliers Antérieur et Postérieur ; SDP= Sac Dorsal Postérieur ; SV = Sac Ventral ; SVP= Sac Ventral Postérieur

Figure2 : Cycle moteur du réticulo-rumen. D'après (53).

Le cycle primaire (ou cycle de brassage) débute par une contraction biphasique du réseau. Le cycle secondaire (ou cycle éructatif) débute immédiatement à la suite de la séquence primaire par une contraction du sac ventral postérieur. Le cycle réticulo-ruminal est dit complet lorsqu'un cycle primaire est suivi d'un cycle secondaire.

La rumination est un phénomène qui est déclenché par la stimulation mécanique de diverses zones réflexogènes (principalement le cardia, le repli rumino-réticulaire et l'orifice réticulo-omasal). La couche fibreuse flottant dans le rumen, constituée de particules alimentaires plus ou moins mastiquées est appelée le matelas fibreux. Ce dernier est responsable du déclenchement du réflexe de rumination. Comme l'a montré Ruckebusch (62), plus ce matelas est important et plus la stimulation des zones réflexogènes est effective. Le nombre de cycles de rumination ainsi que leur durée sont donc directement liées à la fibrosité.

La fréquence des cycles de contraction primaire (FCCP) est étroitement reliée à l'activité masticatoire de l'animal. Pendant l'ingestion, elle est maximale peu de temps après le début du repas, et pendant la rumination, on observe des variations selon les régimes, le niveau d'ingestion et des différences interindividuelles. Les valeurs moyennes varient entre 0,5 et 2,5 contractions par minute. Il existe une relation entre la durée de mastication et la FCCP (57) de telle sorte qu'une heure de mastication supplémentaire journalière augmente la FCCP de 0,05, soit presque 10 % de la valeur basale.

II.1.3.2. Fibrosité et sécrétion salivaire.

En ce qui concerne le maintien d'un environnement favorable au bon développement bactérien dans le rumen, la salive joue plusieurs rôles.

Premièrement, 70 % de l'eau contenue dans le rumen provient de la salive (49). La salive étant produite en grande quantité, permet un renouvellement de la phase liquide. Ceci est très favorable à la prolifération microbienne puisque cela permet de renouveler les substrats bactériens. On peut en effet considérer qu'un renouvellement de 8 % par heure est nécessaire pour ne pas handicaper la croissance bactérienne (65).

Deuxièmement, la salive apporte des substances tampons dans le rumen (22), avec pour conséquence une limitation de l'amplitude des fluctuations de pH dans le rumen (40), qui est comme nous l'avons déjà vu très défavorable à la survie de la micropopulation ruminale. Plusieurs études menées par l'équipe anglo-saxonne de Bailey (5;7;8) ont tenté de quantifier la valeur tampon de la salive en dosant les molécules à l'origine du pouvoir tampon, c'est-à-dire surtout les bicarbonates de sodium, de potassium, ainsi que des phosphates. La composition salivaire est résumée dans le tableau 1.

Composant	Glandes salivaires	
	Glande parotide	Toutes glandes confondues
Sodium (mEq/L)	127	126
Potassium (mEq/L)	7	6
Calcium (mEq/L)	3,3	*
Bicarbonates (mEq/L)	127	126
Phosphates (mEq/L)	23	26
Chlorures (mEq/L)	7	7
pH moyen	8,1	8,6

Tableau 1 : Composition de la salive des bovins. D'après (7).

La première conclusion tirée est que la concentration en molécules tampons reste constante dans la salive lorsque le régime varie (8), ce qui revient donc à dire que la fourniture journalière de substances tampons endogènes peut être déterminée par la quantité totale de salive produite par jour. Une quantification de la valeur tampon de la salive est donnée par Erdman (33). Il précise que les valeurs moyennes de 108 à 308 litres de salive produite par jour sont équivalentes à une sécrétion de 390 à 1134g de Phosphate de sodium par jour et à une sécrétion de 1134 à 3234 g de bicarbonate de sodium par jour. La valeur donnée par Bailey et al. (7) de 127 mEq/L de bicarbonates équivaut à environ 10g de bicarbonates par litre, ce qui est cohérent avec les valeurs données par les autres auteurs. Ces quantités prouvent bien la forte valeur tampon de la salive.

Il a été remarqué que l'augmentation de la durée d'ingestion et de rumination pouvaient augmenter la production salivaire. La vitesse maximale de salivation (mesurée en mL/min) est atteinte pendant la phase de rumination (47). Beauchemin le confirme en exposant des résultats selon lesquels l'augmentation de la quantité de fourrage dans la ration a augmenté la mastication totale d'environ deux heures par jour, correspondant à une augmentation de 18 litres de salive produite par jour, ce qui équivaut tout de même à l'adjonction à la ration de 100 à 150 g de bicarbonate de sodium (11). Ces données sont résumées dans le Tableau 2.

		Activité masticatoire (minutes/jour)	Production salivaire (litres/jour)
Ration 1 (63 % de concentrés et 37 % d'ensilage de luzerne) soit NDF = 26 %	Ingestion	214	40,3
	Rumination	344	130,9
	Mastication totale	558	171,2
	Repos	882	134,2
Ration 2 (41 % de concentrés et 59 % d'ensilage de luzerne) soit NDF = 34 %	Ingestion	260	49,0
	Rumination	414	157,5
	Mastication totale	674	206,5
	Repos	766	116,6

Tableau 2: Production salivaire de vaches laitières estimée par les temps journaliers d'ingestion, de rumination et de repos. D'après (11).

La production salivaire moyenne est de 171 litres par jour (19). Les facteurs de variation de la quantité de salive produite ont été étudiés par plusieurs auteurs. Le tableau 2 montre bien que la salivation est étroitement liée à la mastication totale de la ration, c'est-à-dire à la fibrosité de la ration. Logiquement, les facteurs de variation de la fibrosité sont également des facteurs de variation de la sécrétion salivaire (cf. II.2. Facteurs de variation de la fibrosité).

Quelques conclusions peuvent être tirées : la production salivaire est très dépendante du moment de la journée : la salivation pendant la rumination est plus importante que la salivation pendant l'ingestion, elle-même bien plus importante que la production salivaire pendant les moments de repos (19;58). Il semble de plus que la production de salive pendant les périodes de repos soit plus importante à la huitième semaine de lactation qu'à la quatrième (12).

En conclusion, au vu de toutes ces observations, il est possible d'affirmer que la salivation est considérée comme un bon indicateur de la fibrosité de la ration.

II. 2. Facteurs de variation de la fibrosité.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la mastication totale de la ration. Ces facteurs de variation sont nombreux, et on peut distinguer des facteurs intrinsèques à l'aliment distribué (comme la taille des particules alimentaires, la teneur en fibres, la nature même du fourrage) et des facteurs liés à l'animal (comme le gabarit de l'animal ou le niveau d'ingestion de l'aliment). Nous verrons également que l'ensemble de ces facteurs est important, et il est assez difficile de privilégier un par rapport à l'autre, la mastication étant la résultante de tous ces facteurs.

II.2.1. Facteurs de variation intrinsèques aux aliments.

Un aliment, pour stimuler la mastication, doit être doté de propriétés physiques et chimiques.

II.2.1.1. La taille des particules.

La taille des particules alimentaires est reconnue pour être un des déterminants essentiels de la fibrosité. Balch (9) l'a d'ailleurs utilisée comme premier argument de la démonstration de l'efficacité de son système : le temps de mastication total était réduit pour la paille d'avoine broyée par rapport à la même paille qui n'avait subi aucune réduction de taille.

Beaucoup d'études ont par la suite tenté de relier expérimentalement la taille de l'aliment à la durée de mastication de cet aliment, ou l'effet de la réduction de la taille des particules d'un aliment à la durée totale de mastication de la ration (21;37;51;52;59;80). Les résultats sont assez constants dans l'ensemble : ils montrent que la réduction de la taille des particules a tendance à diminuer la durée totale de mastication, mais cette diminution ne semble pas être une fonction affine, puisque, nous le verrons, la diminution de la fibrosité n'est pas proportionnelle à la diminution de taille.

Nous nous intéresserons ici surtout à la taille des particules du fourrage. Plusieurs auteurs ont consacré leurs travaux à déterminer une longueur critique des particules nécessaire pour maintenir une activité masticatoire suffisante. L'équipe de Shaver (68) a comparé trois tailles de coupe de foin de luzerne. La ration utilisée dans cette étude était du type 60 % de foin et 40 % de grains. Les résultats obtenus montrent qu'une différence significative entre les trois durées totales de mastication n'est obtenue que lorsqu'on utilise le foin sous sa forme la plus

fine (pellets). Les pellets sont des aliments broyés et condensés, dont la taille moyenne des particules alimentaires est de l'ordre du millimètre.

Le tableau 3 donne les principaux résultats de l'étude.

Mesures	Longueur de coupe du foin de luzerne		
	Long (>4cm)	Coupé (0,8cm)	Pellets (0,1cm)
Ingestion, min/j	196	174	> 128
Rumination, min/j	383	398	> 61
Mastication totale, min/j	579	572	> 189
Mastication totale, min/ kg MS	29,2	28,6	> 9,8

Les signes > signifient que les différences sont significatives.

Tableau 3 : Influence de la taille des particules du fourrage sur la mastication de la ration. D'après (68).

Les durées d'ingestion et de rumination étaient plus faibles de 68 et 322 minutes par jour respectivement avec les pellets par rapport au foin long. La distribution de pellets à la place du foin long a diminué la durée totale de mastication de 390 minutes par jour, soit 19,4 minutes par kg de matière sèche ingérée. Le passage de 4 cm à 0,8 cm a par contre été sans effet sur la mastication. En revanche, le passage de 0,8 cm à 0,1 cm a réduit très considérablement le temps de mastication.

Des résultats assez semblables furent obtenus par l'équipe de Woodford (80), qui a mesuré les durées de mastication en réponse à la distribution de trois rations complètes mélangées, contenant 60 % de concentrés et 40 % de foin de luzerne (A), ou 60 % de concentrés, 28 % de foin de luzerne et 12 % de luzerne granulée (B), ou 60 % de concentrés, 12 % de foin et 28 % de luzerne granulée (C). Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. Les compositions des rations sont présentées dans le tableau de la manière suivante : C :F :P, où, C est la proportion d'aliment concentré (en %), F la proportion de foin (en %), et P la proportion de luzerne granulée (en %).

Mesures	Ration (Concentrés : Foin : Luzerne broyée)		
	A (60 :40 :0)	B (60 :28 :12)	C (60 :12 :28)
Ingestion, min/j	186	200	165
Rumination, min/j	463	> 367	> 204
Rumination, min/kg MS	20,0	> 15,6	> 11,1
Rumination, min/ kg foin ingéré	50	56	< 92
Mastication totale, min/j	650	> 560	> 380
Mastication totale, min/kg MS	28,2	> 24,1	> 20,0

Les signes > et < signifient que les différences sont significatives.

Tableau 4 : Influence de la taille des particules du fourrage sur la mastication de la ration. D'après (80).

On remarquera que dans ce cas, les trois durées totales de mastication en réponse au changement de ration sont significativement différentes. En revanche, aucune différence significative n'a pu être établie pour les durées d'ingestion. Ceci revient à dire que la durée totale de mastication suit la même tendance que la durée de rumination. En s'intéressant à la ligne de durée de rumination par kg de foin, Woodford a remarqué que cette durée était plus élevée dans le régime C que dans les régimes A ou B. En supposant que le foin est le composant de la ration qui stimule le plus la rumination, cette valeur plus élevée pour la ration C semble indiquer que les animaux ont développé une réponse d'adaptation à ces conditions d'affouragement, en modérant la chute de rumination face à une diminution de la taille des particules du fourrage. Des résultats semblables en tout point ont été obtenus (37;52) par d'autres équipes. Cependant, ce raisonnement suppose que le foin est le seul composant de la ration capable de stimuler la rumination, et ceci est contradictoire avec l'étude menée par

Bailey (5) qui montre que l'ingestion de concentrés fait saliver, ce qui veut dire que l'ingestion de concentrés n'est pas sans effet sur le temps de mastication comme le laissait supposer Woodford (80). Il serait plus juste de dire que les concentrés stimulent moins la rumination que le foin, mais la mastication des concentrés ne doit pas être négligée.

En résumé, tous les auteurs s'accordent pour dire que la réduction de la taille moyenne des particules de la ration entraîne une diminution de la durée totale de mastication, et donc une diminution de la quantité de substances tampons fournies par la salive. Bailey (5) montre que la production salivaire durant la phase d'ingestion est diminuée par la réduction de la taille des particules.

Cependant, il est difficile de s'accorder sur une valeur limite de taille moyenne. En effet, les méthodes de mesure des particules n'étant pas standardisées, on trouve plusieurs techniques, et en ce qui concerne le tamisage, deux techniques sont utilisables : le tamis à sec et le tamis de particules détremées. Le premier sépare davantage selon le diamètre des particules, alors que le second sépare selon la longueur. En pratique, comme on ne sait pas lequel des deux tamisages est le plus significatif biologiquement, et que le tamisage à sec est le plus rapide, il est utilisé un peu plus souvent que l'autre.

Une conclusion générale que l'on peut tirer est qu'il existe une valeur seuil, au-dessous de laquelle la diminution de taille reste sans effet. Il est indiqué dans la littérature que pour l'ensilage de maïs, une réduction de taille de 1,6 cm à 0,8 cm avait pour conséquence une diminution du temps d'ingestion, alors qu'une diminution de 0,8 à 0,4 cm était sans effet (24). Il est précisé par d'autres auteurs qu'une réduction de la taille des particules du fourrage entre 1 cm et 0,1 cm entraîne une diminution de la durée de mastication totale, mais que cette diminution n'est pas linéaire entre ces deux valeurs. Les diminutions les plus fortes se situeraient en-dessous d'une valeur limite de 0,3 cm (1;21).

La taille des particules a donc une place très importante dans la régulation des valeurs de pH du rumen. Il faut de plus garder à l'esprit que des recommandations sur la taille sont délicates, puisque de nombreuses étapes séparent la récolte de fourrage dans les champs et la distribution de nourriture aux animaux. Il a été démontré que la récolte, le stockage et la manipulation, le mélange et la distribution sont des étapes pendant lesquelles une réduction supplémentaire peut être apportée involontairement.

Des différences sont envisagées selon les types de stockage : par exemple, les ensilages horizontaux ont un besoin de coupe plus important que les ensilages verticaux pour obtenir un tassement identique. En effet, dans le second cas, le poids du silo est tel que le tassement est de toute façon très efficace malgré une coupe plus grossière. Des estimations du temps

maximal de mélange des différents ingrédients de la ration ont aussi été évaluées, car le passage en mélangeuse est une des étapes pendant laquelle la perte de structure physique est la plus importante : les particules de plus de 27 mm peuvent y être réduites jusqu'à 50 % (39).

II.2.1.2. Teneur en fibres de la ration.

L'idée de relier la durée de mastication à la quantité de fibres de la ration a été évoquée depuis déjà plusieurs années. C'est en effet en 1969 que Welch et Smith ont affirmé que la teneur en fibres au détergent neutre (NDF mesuré par la méthode de Van Soest) était le composant nutritionnel des fourrages que l'on pouvait le mieux relier à l'activité masticatoire (77). Depuis, beaucoup d'expérimentations ont été menées pour tenter de quantifier la variation de mastication totale de la ration en fonction des variations de teneur en NDF. Quelques résultats de ces études seront présentés ici (Beauchemin (12) et Kawas (48)). Outre la teneur en NDF, il a été envisagé que d'autres paramètres pouvaient influencer le temps total de mastication. En effet, le taux de cellulose brute a également été soumis à des expérimentations par Kaufmann (47), Dulphy et al. (29), ou Norgaard dont les travaux sont cités dans une publication de Sauvant (65), et la teneur en fibres au détergent acide (ADF mesuré selon la méthode de Van Soest) a été étudié par Kawas (48). Ces résultats seront présentés par la suite. Pour illustrer l'influence du taux de CB dans la stimulation de la mastication nous présenterons les principaux résultats de Kaufmann.

- NDF et temps de mastication

Beauchemin et al. (12) ont formulé trois rations à base d'ensilage (maïs et luzerne) afin d'atteindre des teneurs en NDF dans la ration de 26, 30 et 34 % de la matière sèche. Les résultats quant aux temps d'ingestion, de rumination, et temps total de mastication sont présentés dans le Tableau 5.

Activité masticatoire	Teneur en NDF de la ration		
	26 %	30%	34 %
Ingestion, min /j	214	< 237	< 260
Rumination, min/j	344	< 413	414
Mastication totale, min/j	558	< 651	< 674
Ingestion, min /kg MS	11,7	< 13,2	< 14,6
Rumination, min/kg MS	18,9	< 22,9	< 23,5
Mastication totale, min/kg MS	30,6	< 36,1	< 38,1
Ingestion, min/kg NDF	44,2	43,5	43,6
Rumination, min/kg NDF	71,6	75,0	70,5
Mastication totale, min./kg NDF	115,8	118,8	114,1

Les signes > et < signifient que les différences sont significatives.

Tableau 5: Influence de la teneur en NDF de la ration sur l'activité masticatoire.
D'après (12)

La première conclusion que l'on peut donner est que l'augmentation de la teneur en NDF dans la ration s'est traduite par une augmentation significative du temps total de mastication ($P < 0,01$). Une relation quadratique peut être mise en évidence ($P < 0,05$) entre le temps de mastication et le taux de NDF. Cette augmentation du temps de mastication vient d'une augmentation aussi bien du temps d'ingestion que du temps de rumination. Cependant, il faut noter que les coefficients de variation inter-animaux étaient plus élevés pour le temps d'ingestion que pour le temps de rumination (17,2 % pendant l'ingestion et 9,4 % pendant la rumination). L'augmentation de l'ingestion avec le taux de NDF a suivi une relation linéaire. Si l'on s'intéresse au temps d'ingestion rapporté au kg de NDF ingéré, on remarque que la différence n'est pas significative entre les trois valeurs de NDF, ce qui peut s'expliquer de deux manières : soit la durée de mastication et la teneur en NDF ne sont pas liées, soit la mastication est une fonction linéaire du taux de NDF. Seule cette dernière hypothèse est envisagée par les auteurs. Pour ce qui est du temps de rumination, il a été observé que celui-ci suit une fonction quadratique du taux de NDF. Rapporté au kg de NDF, on n'observe pas de différence significative entre les trois valeurs de NDF, même s'il semble que la valeur associée à 30 % de NDF soit plus élevée que celles associées à 26 et 34 %, ce qui laisse supposer une relation curvilinéaire.

Des résultats tout à fait similaires ont été obtenus par Kawas (48), puisqu'il propose une équation de prédiction du temps de rumination en fonction de la valeur NDF de la ration :

$$RT = -22,9 + 22,3NDF - 0,25NDF^2$$

$$r^2 = 0,41$$

Avec RT = Temps total de rumination, en min/j

NDF = Teneur de la ration en NDF, % MS

L'augmentation du temps d'ingestion est présentée comme une fonction linéaire de la teneur en NDF (48) :

$$ET = 110,8 + 7,3NDF$$

$$r^2 = 0,64$$

Avec ET = Temps d'ingestion, en min./j

NDF = Teneur de la ration en NDF, % MS.

De même pour relier le temps total de mastication à la teneur en NDF, Kawas propose :

$$ChA = 72,5 + 30,7NF - 0,27NDF^2$$

$$r^2 = 0,89$$

Avec ChA = Temps total de mastication, en min/j.

NDF = Teneur de la ration en NDF, % MS.

Ces résultats semblent donc cohérents avec ceux de Beauchemin (12).

Cependant, il apparaît dans la plupart des études qu'il faudrait envisager le temps de mastication comme la composante de plusieurs effets combinés dont le NDF fait partie : toute la variation du temps d'ingestion ne peut pas être expliquée exclusivement par la teneur en NDF de la ration, comme en attestent les coefficients de détermination relativement bas.

Des résultats semblables ont été obtenus durant les mêmes expérimentations en utilisant comme variable explicative la teneur en ADF dans la ration.

- ADF et temps de mastication

Les durées de rumination et de mastication totale sont données par les équations suivantes :

$$RT = 232,4 + 8,0ADF$$

$$r^2 = 0,36, P < 0,01$$

$$ChA = 365 + 17,1ADF$$

$$r^2 = 0,84, P < 0,01$$

Dans ce cas aussi le coefficient de détermination de la première équation ($r^2 = 0,36$) montre bien les limites de l'ADF dans la prédiction du temps de rumination.

- CB et temps de mastication

Dans ses travaux, Kaufmann (47) a relié le pH ruminal à la variation du taux de CB dans la ration. Le schéma expérimental mis en place ne faisait varier que le taux de cellulose brute. Il s'ensuivait une augmentation du taux d'amidon dans le fourrage. La variable réponse était le pH ruminal. On peut faire l'analogie entre le pH ruminal et le temps de mastication, puisque ces deux paramètres sont liés par la production salivaire. La proportion d'aliment concentré reste constante entre toutes les expérimentations, mais la quantité d'amidon total étant augmentée, le profil fermentaire est lui aussi modifié : le pH ruminal s'oriente davantage vers l'acidité. Ainsi, Kaufmann a pu établir une relation entre le pH et la teneur en CB :

$$pH = 0,066CB + 5,115$$

$$r^2 = 0,91.$$

Malgré le fort coefficient de détermination, on comprend que le pH ne peut pas être déterminé uniquement par le taux de CB.

Cette équation ne permet pas de quantifier l'influence de la teneur en CB sur la durée de mastication, mais permet de mettre en évidence une quantité de substances tampons trop

faible pour maintenir le pH ruminal à des valeurs normales. La concentration de la salive en substances tampons étant constante, ce déficit en substances tampons correspond à un déficit de production de salive, donc à un défaut de mastication. La conclusion à tirer de ces résultats est que la teneur en cellulose brute de la ration est positivement reliée à la quantité totale de mastication. Trop peu d'études ont été réalisées pour pouvoir affirmer avec certitude que ces résultats sont répétables.

D'autres études (31) ont essayé de relier la teneur en CB aux temps de mastication mesurés pour différentes rations. Le calcul du rapport IF/CB (où IF est l'indice de fibrosité de la ration, c'est-à-dire le temps de mastication totale en min/kg de MS, et CB la teneur en CB en % MS) montrait une grande variabilité entre les différentes classes de fourrage utilisés (dans l'expérience de Dulphy (30), un ensilage d'herbe et un ensilage de maïs étaient comparés). En effet, Dulphy a obtenu $IF/CB = 3,37$ pour l'ensilage de maïs et $IF/CB = 2,54$ pour l'ensilage d'herbe. Ceci a conduit Dulphy et al. (30) à conclure que la teneur en CB était peut-être un critère de prévision de la fibrosité utilisable, mais uniquement à l'intérieur d'une catégorie de fourrages (foin de graminées, foin de luzerne, ensilage de maïs, ensilage d'herbe). Les auteurs précisaient d'ailleurs que pour faire abstraction de la nature du fourrage, d'autres critères devaient être utilisés, comme le résidu NDF. (cf. II.2.1.3. Influence de la nature du fourrage).

La plupart des études réalisées ont été ciblées sur la valeur NDF des rations, et de ce fait, il est plus aisé de tenter de généraliser les résultats relatifs à la valeur NDF.

En reprenant les valeurs du tableau 7, Beauchemin et al. (12) mettent en évidence une diminution du temps de rumination /kg de NDF (de 75,0 min/kg NDF à 70,5 min/kg NDF lorsqu'on passe d'un régime de 30 à 34 % NDF) lorsque la valeur NDF du régime augmente. En admettant que la rumination est nécessaire seulement à réduire la taille des particules du fourrage, Beauchemin affirme qu'on assiste à une augmentation de l'efficacité de la rumination avec l'augmentation de la teneur en NDF. De ce fait, Beauchemin considère le temps de rumination / unité de NDF consommé comme un indice de fragilité des parois cellulaires. L'augmentation de cette efficacité peut avoir plusieurs origines : une augmentation de l'efficacité masticatoire pendant la phase d'ingestion, ou une meilleure digestion ruminale microbienne du fourrage (c'est-à-dire une augmentation des dégâts causés aux fibres par l'attaque bactérienne). La meilleure efficacité digestive des bactéries peut être reliée à une amélioration des conditions environnementales, par exemple un pH du liquide ruminal plus élevé, ce qui, rappelons-le, améliore l'activité cellulolytique. Ce raisonnement proposé par Beauchemin (12) est fondé sur une différence non significative. Il paraît

hasardeux de donner des explications rationnelles à partir de données dues au hasard. Peu d'études confirment l'existence de cette synergie entre la mastication et la digestion microbienne, ceci à cause de la lourdeur de l'équipement nécessaire à de telles manipulations (digestion in sacco), mais quelques études semblent tout de même le constater (10).

II.2.1.3. Influence du type d'aliment.

La nature des aliments est présentée par Bailey (5) comme étant un facteur de variation très important. Dans ses travaux, Bailey a comparé trois types de fourrage (foin, ensilage et herbe fraîche), ainsi que l'aliment concentré. Le tableau 6 résume ses résultats.

Aliment	Production salivaire			Vitesse d'ingestion
	mL / g d'aliment	mL / g de MS	mL / min	g d'aliment/ min
Concentrés (granulés)	0,68	0,76	241	357
Herbe fraîche	1,12	4,48	250	274
Ensilage	1,13	3,76	273	248
Foin	3,63	4,03	240	70

Tableau 6: Effet du type d'aliment sur la production salivaire. D'après (5).

Ces résultats montrent que la production salivaire est plus importante pour les aliments de type fourrage par rapport aux aliments de type concentrés. Il remarque que la vitesse de salivation (exprimée en ml de salive produit par minute) est très peu variable selon les types d'aliment, mais la vitesse d'ingestion des différents aliments est très variable : les concentrés sont ingérés environ 5 fois plus vite que les aliments comme le foin. La proportion de fibres dans l'aliment est proposée comme étant un facteur de variation essentiel de la production salivaire, car la sécrétion salivaire est déclenchée par la stimulation mécanique de certains récepteurs situés à l'intérieur de la bouche, de l'œsophage, ou à proximité de l'orifice réticulo-omasal. Church (20) rapporte qu'une vache qui possédait une canule dans une glande parotide avait une production de salive accrue du fait de la stimulation buccale par ce corps étranger.

Quelques études ont permis de comprendre que selon la nature du fourrage distribué, certains paramètres physiques ou chimiques avaient plus de poids relatif quant à la stimulation de la mastication. Les travaux de De Boever et De Brabander (25) semblent parmi les plus

pertinents, puisqu'ils ont étudié pour quelques types de fourrages couramment utilisés en pratique plusieurs paramètres physiques (la longueur des brins du fourrage) ou chimiques (le taux de NDF, d'ADF ou de CB) (24). Les fourrages étudiés étaient l'ensilage d'herbe et l'ensilage de maïs.

Pour l'ensilage d'herbe, les auteurs ont utilisé deux stades de coupe, ce qui faisait varier les valeurs NDF, ADF et CB de l'aliment. La mesure des activités masticatoires a révélé une plus forte mastication pour l'ensilage tardif par rapport à l'ensilage précoce. Les trois paramètres chimiques cités étaient significativement reliés à la durée de mastication, mais celui qui était le plus relié à cette durée était le taux de CB. De même, trois tailles de coupe de l'herbe à la récolte ont été utilisées pour mettre en évidence un effet longueur des brins du fourrage sur la durée de mastication. Les résultats ont montré que la longueur des brins était sans effet sur l'activité masticatoire. Seul le cas d'une coupe très fine (< 20 mm) a permis de montrer une diminution de la durée de mastication. Cependant cette valeur de 20 mm n'est pas très utilisée en pratique, puisque les longueurs usuelles des brins de l'ensilage d'herbe sont environ 10 cm pour un ensilage brins longs contre environ 4 cm pour un ensilage brins courts.

La conclusion que la mastication de l'ensilage d'herbe est peu sensible à la longueur de coupe, mais dépend du stade de récolte est tout à fait cohérente avec les travaux réalisés par Kaiser (46).

Pour l'étude de l'ensilage de maïs, le même principe a été utilisé : les auteurs ont fait varier premièrement le stade de maturité de la plante au moment de la récolte, et deuxièmement la longueur de coupe. Dans ce cas, il a été démontré que l'activité masticatoire était reliée significativement au stade végétatif, et le paramètre qui permettait de prédire la durée de mastication avec le plus de précision était le taux de CB. La longueur de coupe a montré également une étroite relation avec la mastication, mais seulement pendant la rumination. L'ingestion n'était modifiée par taille des particules que pour une longueur importante (> 16 mm). Cette taille est peu utilisée en pratique, puisque la taille moyenne de l'ensilage de maïs est de l'ordre de 1 cm. Ces résultats sont cohérents avec ceux publiés par Kuehn et al. (50).

Des résultats assez semblables obtenus par Dong sont rapportés par Beauchemin (11) : la source de fourrage a un effet sur les temps de mastication et la production de salive. Le Tableau 7 illustre ces observations.

Fourrage	Longueur de coupe (mm)	Ingestion		Production de salive	
		g MS / min	Nbre de coups de mâchoire/min	g/ min Mastication	g / g de MS
Brome	3,5	39,2	75,4	1,93	3,73
	9,9	33,3	76,3	1,79	4,09
Luzerne	2,0	41,5	76,5	2,03	3,74
	6,2	37,9	74,9	2,21	4,37

Tableau 7 : Effet de la source de fourrage et de la taille des particules sur la production de salive, d'après (11)

II.2.1.4. Influence du niveau d'apport de concentrés.

Bien qu'un nombre important d'études aient été publiées sur ce sujet (61), il semble maintenant évident que l'augmentation du taux de concentrés dans la ration est préjudiciable à un bon fonctionnement ruminal, et l'augmentation de la proportion de concentrés diminue la durée de mastication. Cet aspect doit être rapproché du point discuté plus haut sur l'efficacité de la digestion microbienne. Un excès de concentrés stimule et favorise la flore amylolytique aux dépens de la flore cellulolytique. Ceci fait également apparaître des interactions entre le taux de NDF dans la ration et le taux de concentrés, mais ce point sera discuté un peu plus bas.

Des précisions chiffrées peuvent être apportées avec l'appui de résultats des travaux de Dulphy et al. (30). Dans cet essai, quatre rations différentes variant par la proportion d'aliment concentré ont été distribuées à huit vaches laitières (0 %, 15 %, 27 %, 37 %). Les durées de mastication totale, d'ingestion et de rumination ont été mesurées. Ceci a permis d'obtenir à l'aide de calculs de régression plusieurs équations de prédiction de la durée de mastication. Une nous intéresse particulièrement puisqu'elle relie la durée de mastication de la ration (en min/kg de MS) à la proportion de concentrés.

$$DMr = 62,7 - 54,1C$$

$$r^2 = 0,63$$

Avec DMr = Durée de mastication de la ration en min/kg MS

C = Proportion de concentré intégré à la ration, et $0 \leq C < 1$.

La durée de mastication de la ration diminue donc nettement avec la proportion de concentré, (0,54 minute de mastication en moins par % de concentré ajouté à la ration). Une valeur un peu différente est donnée par d'autres auteurs (65), de l'ordre de 0,28 minute de mastication en moins par % de concentré. Une différence est également à noter entre ces deux essais, il s'agit de l'influence de la quantité ingérée totale (cf. II.2.2.2 Effet du niveau d'ingestion), significative selon Sauvart (65) mais pas selon Dulphy et al. (30).

Ces résultats de Dulphy sont intéressants, car ils permettent de discuter de l'hypothèse largement répandue impliquant la digestion microbienne, donnée pour la première fois par Guérin et al. en 1984 (38). Selon cette hypothèse, l'augmentation de concentrés favorise le développement de la flore amylolytique, diminue l'activité bactérienne cellulolytique, ce qui entraînerait chez le ruminant une augmentation de la mastication lors de l'ingestion pour compenser la moins bonne digestion ruminale, avec pour conséquence de proposer à la flore un aliment plus facile à attaquer puisque partiellement réduit. Or, l'expérimentation de Dulphy et al. (30) ne montre pas de changement du temps d'ingestion du fourrage. Le fait que le temps d'ingestion soit constant entre les quatre régimes (observation également faite dans d'autres essais (31), (73)), semble faire apparaître une valeur seuil du taux de concentrés jusqu'à laquelle aucune interaction entre le fourrage et le concentré sur la durée de mastication du fourrage n'est visible. Cette valeur se situerait aux alentours de 40 %, puisque de fortes interactions sont constatées pour 50 % de concentré dans la ration. Cette hypothèse est confirmée par les travaux de Woodford (79), qui montre une augmentation de la mastication du fourrage de 55 à 64 min/kg MS lorsque la proportion de concentré passe de 47 à 72 %.

II.2.1.5. Qualité de la coupe des particules de la ration.

Il est assez fréquent de parler en pratique de la netteté de la coupe des particules : des observations de terrain affirment qu'une coupe nette stimule plus la rumination qu'une coupe faisant apparaître des brins effilochés. Aucune donnée bibliographique n'a été trouvée sur ce point.

II.2.1.6. Influence de la teneur en protéines de la ration.

Peu de données sont disponibles sur cet aspect de la fibrosité, mais des travaux de Freer et al. (36) semblent montrer une diminution du temps d'ingestion et de rumination par kg de MS, de l'ordre de 18 à 38 % respectivement après avoir supplémenté des vaches tarées (nourries avec de la paille à 2,9 % de protéines brutes) avec 150 g d'urée par jour. Une explication de

cette observation peut être que, l'urée augmentant la cellulolyse, la mastication devient moins nécessaire. Cependant, les valeurs présentées ici sont des valeurs extrêmes, car une teneur de 2,9 % de protéines brutes est préjudiciable à la survie des animaux.

II.2.2. Facteurs de variation relatifs aux animaux.

Plusieurs aspects seront envisagés ici, en premier lieu la variation individuelle de la durée de mastication, puis d'autres comme le niveau de production, le niveau d'ingestion ou des caractéristiques physiques propres aux animaux.

II.2.2.1 Variation individuelle de la durée de mastication.

Ce critère a déjà été rapidement évoqué ci-dessus (relation entre NDF et mastication). Les premiers travaux mettant en jeu des mesures de temps d'ingestion ou de rumination ont fait apparaître une variabilité importante, pour un même régime du temps de mastication selon les animaux. La difficulté d'interpréter ces relations vient du fait que les animaux n'étaient pas absolument standardisés sur tous les critères. Cependant, il faut reconnaître qu'une telle standardisation est illusoire, puisque cela implique de connaître avec certitude tous les facteurs de variation, et de pouvoir attribuer à chacun un poids relatif. Plusieurs critères ont été supposés, comme la production laitière, le stade physiologique, la capacité d'ingestion, l'efficacité masticatoire, le poids de l'animal, mais sans donner de précisions sur le standard à utiliser (23). De même pour la sécrétion salivaire, une bonne partie des variations de production peuvent s'expliquer par une grande variabilité interindividuelle de la sécrétion salivaire. De plus, les techniques de mesures de flux salivaires n'étant pas standardisées, elles peuvent expliquer de grosses variations inter-expériences.

Welch et al. ont montré que la durée de mastication par kg de MS variait à l'inverse du poids de l'animal (77). Cette observation vient du fait que la durée de mastication varie peu d'une espèce de ruminant à une autre, et qu'il semble exister une valeur maximale de rumination de 1000 à 1100 minutes par jour (82,2 % de la journée selon Jarrige (43)) . Dans ses travaux sur des moutons, Dulphy a conclu que les animaux les plus lourds ingéraient plus d'aliment que les légers (28). Ces travaux aboutissent à la proposition d'exprimer les valeurs de mastication rapportées au poids métabolique de l'animal. Le poids métabolique est $P^{0.75}$, avec P le poids vif en kg. Malgré cette correction apportée, il a été observé que l'efficacité de la mastication

reste tout de même plus élevée pour les animaux les plus lourds. Plusieurs hypothèses peuvent être imaginées pour expliquer cette différence d'efficacité, comme par exemple une mâchoire plus faible musculairement chez les animaux légers, ou un fonctionnement ruminal inadapté par défaut de développement. Cependant, cette dernière hypothèse est discutable, puisque les petits ruminants ont un système digestif fonctionnel leur permettant une utilisation optimale des aliments. Les travaux de Bae et al. montrent l'existence d'une relation linéaire entre l'efficacité de la mastication et le poids métabolique des animaux au même stade de croissance (3).

II.2.2.2 Effet du niveau d'ingestion

D'une manière générale, le temps total de mastication par kg MS consommé décroît lorsqu'on augmente le niveau d'ingestion. Dans l'étude de Bae et al. (4), plusieurs niveaux d'ingestion de foin étaient utilisés, et les auteurs ont mesuré les variations des temps de mastication, en subdivisant ingestion et rumination. Les durées de mastication étaient exprimées en min/kg de constituants de parois cellulaires (NDF approximativement). Cette unité, nous le discuterons plus tard, ne semble pas être très pertinente pour caractériser la valeur physique d'un aliment (comme sa propension à stimuler la mastication), mais dans le cas précis de cette étude cela ne pose aucun problème, puisque la ration n'était constituée que de foin, et l'expression des résultats en min/kg NDF revenait à exprimer ces résultats en min/kg MS.

Les résultats ont montré une différence de comportement des temps d'ingestion et de rumination face à un changement de la quantité de matière sèche ingérée. Dans les conditions expérimentales, le temps total de mastication par kg de NDF était resté relativement constant, mais de grandes différences ont été observées pour les temps d'ingestion et de rumination. L'augmentation du niveau d'ingestion de foin s'accompagnait d'une augmentation du temps de mastication pendant l'ingestion et d'une diminution du temps de rumination. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bailey et al. (6) qui ont nourri des vaches avec du foin au moyen d'une fistule ruminale : le foin était directement placé dans le rumen, la phase d'ingestion étant ainsi supprimée. Des comparaisons avec des animaux nourris normalement avec le même foin ont montré que le temps de rumination était significativement plus élevé pour les animaux avec fistule par rapport aux animaux nourris normalement : le temps de rumination passait de 30 % de la journée à 44 % de la journée. Il existerait donc un phénomène de compensation du temps total de mastication entre l'ingestion et la rumination.

Cependant, ces résultats ne sont pas en accord avec d'autres études prouvant une diminution du temps total de mastication en réponse à une augmentation du niveau d'ingestion. Ceci peut s'expliquer par les faibles quantités de fourrage distribué pendant l'étude de Bae et al. (4) (la quantité distribuée passe de 4 kg à 9 kg de foin, une faible quantité de concentrés de l'ordre de 1 kg par jour était également proposée, car les auteurs s'étaient au préalable assurés que celui-ci n'interviendrait pas dans les variations de mastication). En effet, la relation proposée par Sauviant et al. (65) et confirmée dans d'autres études (11;51) indique une non linéarité entre durée totale de mastication de la ration et niveau d'ingestion. L'équation proposée est la suivante :

$$DM = 202,5 - 13,5MSI + 0,26MSI^2$$

Avec DM = Durée de mastication de la ration en min/kg MSI

MSI = Matière Sèche Ingérée

La non linéarité de cette durée de mastication pose un problème pour la comparaison de valeurs de fibrosité d'aliments intégrés à des niveaux d'ingestion différents dans les rations. Carter (18) montre que la production salivaire est une fonction linéaire du niveau d'ingestion, car les animaux produisent davantage de salive lorsqu'ils ingèrent plus de matière sèche. Le taux de matière sèche est également présenté par Norgaard comme étant également un facteur de variation important (58). Pour un même type d'aliment, la production salivaire augmente avec le taux de matière sèche.

II.2.3. Variations selon le temps d'accès à la nourriture.

Le temps d'accès à la nourriture a été à plusieurs reprises relié au temps de mastication total. La conclusion la plus fréquemment donnée est qu'à la suite d'une restriction du temps d'accès à la nourriture, on observait une augmentation de la vitesse d'ingestion, avec possibilité d'une compensation pendant la phase de rumination par une augmentation de sa durée. Cette compensation n'est pas constante suivant les auteurs (16;23;36). De même, la réponse à une restriction est très nette lorsque l'on passe d'une alimentation en libre service (accès à la nourriture 24 heures par jour) à une durée d'alimentation de 5 heures, alors qu'une réduction à 8 heures est sans effet sur les paramètres de mastication de la ration.

Ces facteurs de variation pris individuellement en compte ne permettent pas d'expliquer toutes les variations de fibrosité du régime. Une approche plus précise peut être obtenue en envisageant des interactions entre plusieurs facteurs, à la fois alimentaires et liés aux animaux. Plusieurs systèmes ont donc été proposés dans le monde pour caractériser physiquement les régimes selon leur faculté à stimuler la mastication et donc la production de salive. Selon la quantité de facteurs pris en compte, nous verrons que ces systèmes sont plus ou moins performants.

Partie III : Les différents systèmes et recommandations de fibrosité utilisés.

Dans cette partie nous présenterons les systèmes proposés pour caractériser la fibrosité des régimes en tentant d'en dégager les avantages et les inconvénients.

III.1. Le système de Balch 1971 (9).

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, Balch fut à l'origine des recherches sur la fibrosité puisqu'il a proposé d'évaluer les caractéristiques physiques d'un aliment en mesurant la durée totale de mastication pendant l'ingestion et la rumination. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un système de prédiction de la fibrosité, mais plutôt d'une table de valeurs de la fibrosité. Ces valeurs ont été mesurées, et montrent de grosses différences suivant les aliments. Balch propose d'exprimer le temps de mastication par kg de matière sèche afin d'obtenir des valeurs utilisables pour n'importe quel type de régime. L'idée d'utiliser la somme des temps d'ingestion et de rumination vient de l'observation qu'il existe un phénomène de compensation entre ces deux phases de l'alimentation des ruminants, puisque les deux paramètres peuvent varier indépendamment et que la salivation est importante durant ces deux phases.

Quelques résultats sont présentés dans le tableau 8.

Ce système tient compte de la nature et de la taille de coupe du fourrage, de la proportion du concentré, et par l'expression de la durée totale de mastication en minutes par kg de matière sèche ingérée permet de comparer deux régimes indépendamment de leur niveau d'ingestion.

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il ne suffit pas d'exprimer la durée de mastication par kg de matière sèche pour s'affranchir du facteur niveau d'ingestion, puisqu'il existe une relation non linéaire entre le niveau d'ingestion et le temps de mastication.

De plus, les résultats proposés montrent une variabilité assez importante, et ne tiennent pas compte du caractère animal : ces résultats ont été obtenus en faisant la moyenne des résultats obtenus sur 5 vaches.

Régime	Ingestion	Rumination	Total
Fourrage seul			
Paille	41-58	94-133	145-191
Foin qualité moyenne	20-40	63-87	103-109
Foin bonne qualité	27-31	55-74	87-105
Paille finement coupée	11-24	0-20	11-31
Foin finement coupé	13	0-6	13-19
Fourrage + concentrés			
67 % foin	19	47	66
44 % foin	18	42	60
31 % foin	15	37	52
17 % foin	11	24	35
0 % foin	10	0	10
60 % paille	18	44	62
40 % paille	17	36	53
20 % paille	16	20	36
0 % paille	21	0	21

Tableau 8 : résultats des mesures de fibrosité de quelques aliments selon Balch (9)

III.2. Sudweeks 1981.

Les travaux de Sudweeks et al. (71) se sont portés sur la détermination de la fibrosité des différents composés de la ration (fourrages et concentrés). Plusieurs régimes avec un niveau d'ingestion constant, variant par la proportion de fourrage ont été distribués à des animaux adultes. Les temps de mastication ont été enregistrés. L'hypothèse de départ était qu'il n'existe pas d'interaction entre les fourrages et les concentrés dans les durées d'ingestion ou de rumination. Sudweeks et al. (73) ont alors calculé la durée de rumination des fourrages et des aliments séparément, en mesurant premièrement la durée de rumination de la ration sans concentrés, puis la durée de rumination de la ration avec concentrés. Les auteurs ont ainsi pu

donner les valeurs de fibrosité de différents aliments, fourrages ou concentrés. Quelques valeurs sont présentés dans le tableau 9.

Nature de l'aliment	Durée de mastication, min /kg MS
Foin de luzerne	
Coupé	44,3
Brins longs	61,5
Granulé	36,9
Paille	
Brins longs	160,0
Paille coupée finement et granulée	18,0
Ensilages	
Ensilages de luzerne	
Coupe fine	22,3
Coupe moyenne	26,0
Ensilages de maïs	
Coupe grossière	66,1
Coupe moyenne	59,6
Coupe fine	40,0
Ensilage d'herbe	99-120
Grains et concentrés	
Orge broyée	15,0
Concentré en granulés	12,0
Blé broyé	10,0

Tableau 9 : Les valeurs de fibrosité des aliments selon Sudweeks et al. (71)

Ces résultats tiennent compte de la nature du fourrage, de la proportion de concentrés (et de la nature de celui-ci), de la taille de présentation du fourrage. Cependant, ces valeurs sont

déterminées à un niveau d'ingestion constant, et comme le niveau croissant d'ingestion entraîne une diminution notable de la fibrosité des aliments, une autre précision a dû être apportée, en tenant compte de l'effet négatif de l'ingestion sur la fibrosité. Les auteurs ont constaté que la fibrosité diminue en moyenne de 1,91 minute par kg de MS ingéré.

Les valeurs données dans le tableau 9 sont issues d'observations, et les auteurs proposent une méthode pour calculer ces indices de fibrosité à partir de données de laboratoire.

La relation donnée est la suivante :

$$RVI = 10,86 + 21,59PS - 1,91DMI + 0,541NDF$$

$$r^2 = 0,78$$

Avec RVI = Indice de fibrosité (Roughage Value Index), en min/kg MS

PS = la taille des particules, (approchée par le diamètre moyen), en mm

DMI = la matière sèche ingérée, en kg

NDF = la teneur en NDF, en % de MS.

Les points faibles de cette relation résident premièrement dans la détermination de la taille moyenne des particules, puisqu'il n'existe pas de méthode de tamisage standardisée, et l'auteur envisage l'utilisation d'un tamis oscillant séparateur de particules. De plus, il est délicat de parler de diamètre pour une particule alimentaire, ceci supposant de modéliser les fibres par des cylindres, et ceci n'est pas vrai en pratique. Le calcul de la valeur moyenne peut aussi être contourné en utilisant 4,75 mm comme valeur standard pour caractériser les foin à fibres longues. Deuxièmement, l'équation proposée par Sudweeks et al. n'est valable que pour des quantités de matière sèche ingérée correspondant à une ration d'entretien (de l'ordre de 10 à 12 kg par jour), ce qui est très nettement différent de l'ingestion d'une vache laitière en lactation. Une autre équation proposée par Sudweeks et al. (72) permet de prédire les valeurs de fibrosité des rations ingérées à des niveaux jusqu'à 165 % de l'ingestion à l'entretien.

L'équation d'ajustement pour l'ingestion est :

$$RVI = (130 + 47,22x) / x$$

Avec RVI = Fibrosité, en min/kg MS

x = quantité ingérée, en kg

Ensuite, une fois déterminée la fibrosité, l'auteur propose de déterminer le besoin en fourrage dans la ration, en utilisant la quantité de matière grasse dans le lait. En effet, il relie la quantité de matière grasse au temps total de mastication par une équation de régression, et obtient ainsi une valeur de TB fonction de l'indice de fibrosité.

L'équation permettant de déterminer les besoins en indice de fibrosité par rapport au TB est :

$$TB = 2,46 + 0,039RVI - 0,00018RVI^2$$

Ainsi, pour un TB de 3,5 %, la valeur minimale de l'indice de fibrosité est égale à 31,1 min/kg. Les auteurs ont montré l'efficacité de cet indice pour formuler des rations satisfaisant à la fois des contraintes énergétiques et des contraintes de structure à l'aide de trois exemples de rations, formulées en tenant compte ou non des contraintes de fibrosité. Dans ces exemples, les auteurs montrent que le fait de supprimer de la ration un fourrage de bonne fibrosité, et de le remplacer par un aliment qui fournit convenablement les nutriments nécessaires à l'animal pour sa production, ne permet pas de maintenir une bonne fibrosité. Les auteurs utilisent alors des aliments à forte fibrosité pour restaurer une fibrosité convenable.

III.3. Santini 1983.

Les travaux de Santini et al. (63) ont été motivés par le fait que les résultats proposés jusqu'alors pour évaluer la fibrosité des régimes faisaient apparaître une variation non seulement selon le niveau total d'ingestion, mais aussi selon la taille des particules du fourrage. Pour établir avec précision des indices de fibrosité, il conviendrait donc de réaliser des mesures pour chaque niveau d'ingestion et pour chaque forme physique de présentation des aliments. Santini et al. (63) ont donc proposé d'intégrer la longueur moyenne des particules dans le calcul de la fibrosité des régimes, en créant une variable prenant en compte à la fois le niveau d'ingestion et la taille moyenne des particules ingérées. Cette variable a été appelée « ingestion ajustée ». L'ingestion ajustée est le produit de l'ingestion (en kg de MS) par la longueur moyenne des particules (en cm), elle est donc exprimée en kg.cm. Les résultats des durées de mastication pendant l'ingestion, la rumination et la durée totale de mastication ont été reliés à cette ingestion ajustée, et des équations de régression ont été établies.

Les résultats nous donnent :

$$DM = 365,2 - 69,6X + 4,73X^2$$

Avec DM = Durée de mastication totale par kg.cm d'ingestion ajustée

X = ingestion ajustée, = ingestion * taille moyenne des particules, en kg.cm

L'intérêt de ces travaux est de pouvoir appliquer les résultats afin de calculer les indices de fibrosité de fourrages coupés à différentes longueurs. L'idée de contourner l'obstacle de la taille des particules pour la mesure des indices de fibrosité est intéressante, mais la relation obtenue reste peu évidente à utiliser en pratique. Un problème majeur qui se pose est la détermination de la taille moyenne : cette valeur moyenne implique une mesure de la taille des particules grâce à un tamis, mais à ce jour les essais de standardisation de ces méthodes n'ont pas été réalisés. Peu de références bibliographiques ont utilisé ces travaux pour des essais de terrain, et trop peu d'observations ont été utilisées dans l'expérimentation pour affirmer que l'équation de régression obtenue est universellement valable. Dans ces conditions, il faut attendre d'autres travaux pour évaluer la pertinence de ces résultats.

III.4. Le système danois de Norgaard.

Ce sont les travaux de Norgaard qui sont à l'origine du développement du système de fibrosité danois. Ces travaux de 1983, repris dans les articles de Sauvant (64;65), se portent essentiellement sur deux critères : premièrement la taille des particules, et deuxièmement la teneur de l'aliment en cellulose brute.

Plusieurs relations sont données par Norgaard en fonction de la teneur en CB. Le tableau 10 présente les bases de ce système.

Traitement technologique	Taille moyenne des particules (en mm)	Indice de fibrosité (min/kg MS)
Broyage fin	<1	4
Broyage grossier Céréales aplaties	1 < Longueur < 5	10
Hachage fin	5 < Longueur < 10	0,75. CB (% MS)
Hachage grossier	10 < Longueur < 50	2,25. CB (% MS)
Fourrages longs	> 50	3. CB (% MS)

Tableau 10 : Principes du système danois d'indice de fibrosité. D'après Norgaard (57).

Norgaard précise aussi que ces trois relations sont applicables à l'intérieur d'une catégorie de fourrages distinguée par le taille moyenne de ses brins.

- la relation $IF = 0,75 \cdot CB$ caractérise les sous-produits (pulpe de betteraves, drêches de brasserie)
- la relation $IF = 2,25 \cdot CB$ correspond aux fourrages verts et ensilés
- la relation $IF = 3 \cdot CB$ correspond aux foin et aux pailles.

Plusieurs études tendent à montrer que ces relations ne suffisent pas à caractériser la fibrosité des fourrages, puisque par exemple, d'importantes différences de valeur de fibrosité entre les foin et les fourrages verts ou ensilés de même teneur en CB sont constatées. Ces différences peuvent atteindre jusqu'à 40 min/kg, ce qui fait du système danois un système trop peu précis. Ce système peut également être considéré comme insuffisant parce qu'il ne prend pas en compte tous les facteurs de variation de la fibrosité, comme par exemple le niveau d'ingestion, ni les phénomènes d'interaction entre les critères physiques et chimiques de la ration. En effet, Norgaard donne une valeur de fibrosité par classe de fourrage, mais il n'indique pas ce qui se passe pour un fourrage coupé. En effet, dans le tableau, Norgaard considère que les tailles des particules suffisent à caractériser le fourrage : les fourrages longs

(> 50 mm) sont donc assimilés aux foins et aux pailles, mais l'utilisation de paille coupée (< 50 mm) n'est pas envisagée ici. La littérature confirme le faible intérêt de la teneur de CB pour évaluer la valeur d'indice de fibrosité d'un régime, puisque la variabilité atteint 1,82 minute par point de CB % MS (65).

III.5. Le système RVU de Mertens.

Depuis maintenant plusieurs années, des auteurs des États-Unis ont préconisé d'estimer la fibrosité des rations des vaches laitières par le biais de la teneur en NDF des aliments. Plusieurs niveaux de recommandations ont été proposés par Mertens (54;64) : en 1982, il publiait un article recommandant NDF = 35 % de la matière sèche ingérée. Puis, en 1985, est apparue la notion d'ingestion optimale, qui faisait intervenir le critère animal (inexistant dans la première proposition), en adaptant la quantité de NDF à fournir au poids vif de l'animal. Une autre contrainte était imposée : la source de NDF. Une différence a été observée entre les sources de fibres des concentrés et les fibres du fourrage. La proposition de 1985 est : ingestion de NDF = 1,1 % du poids vif (avec une tolérance par rapport à cette recommandation, de l'ordre de 35 % acceptable), dont 75 % issu du fourrage, soit 6,6 kg par jour pour une vache de 600 kg, avec un écart-type de 1,25 kg.

Cette dernière relation ne tient pas compte des exigences des vaches laitières fortes productrices qui ont un gros besoin d'énergie. Cette proposition ne tenait pas compte de la taille des particules, et en 1986, Mertens propose un nouveau critère, nommé l'unité de valeur de fourrage (RVU), et qui prend en considération à la fois la teneur en NDF et la taille des particules. La mesure des particules permet de déterminer le seuil effectif des particules, évalué à 1,18 mm. L'équation proposée pour déterminer RVU est :

$$RVU = NDF * (\textit{proportion de particules} > 1,18 \textit{ mm}).$$

Le système a ensuite été amélioré en intégrant également la concentration en glucides non structuraux, connus pour avoir des effets acidogènes. Ces travaux ne tenaient pas compte du stade physiologique de la vache, et des besoins en fibres effectives en fonction du poids vif ont été publiés suivant le moment de la lactation : le besoin en fibres effectives vaut 0,8 % PV à la mise-bas, 1,2 % PV après 100 jours et 1 % PV pendant la gestation.

III.6. Le système peNDF

En 1997, Mertens proposait un nouveau système, consistant à utiliser un terme plus précis que la fibre effective, il s'agit de la teneur en NDF physiquement efficace dans la ration, noté peNDF (55). peNDF est le produit de la teneur en NDF et d'un facteur d'efficacité physique pef. Ce nouveau concept s'appuie sur le fait que peNDF est relié aux caractéristiques physiques des fibres (principalement leur longueur) qui influencent la mastication, alors que eNDF n'est relié qu'à la capacité d'un aliment à maintenir un taux butyreux constant par sa proportion de fibres. peNDF est lié aux caractéristiques de fibrosité, comme les indices de fibrosité définis jusqu'alors, mais en diffère parce que peNDF est basé sur la teneur en NDF et sur l'efficacité de NDF à stimuler la mastication plutôt que d'être exprimé en minutes d'activité masticatoire par kg de matière sèche. L'intérêt est que pef est indépendant de la taille de l'animal ou de son niveau d'ingestion.

Mertens propose de comparer les aliments à un standard qui permettrait la plus forte mastication possible par kg de MS ou par kg de NDF. Ainsi, il a imaginé un foin d'herbe brins longs, contenant 100 % de NDF, affecté d'un pef égal à 1, de sorte que ce standard théorique donne $peNDF = 100$. Ce foin de référence permettrait 240 minutes de mastication par kg de MS ou de NDF pour des vaches avec un niveau d'ingestion égal à 2 fois le niveau d'ingestion à l'entretien.

Bien que la variation de la durée de mastication pour différents fourrages soit liée principalement à la teneur en NDF, la mastication par kg de NDF augmente avec l'accroissement de la teneur en NDF des fourrages longs. Mertens a donc proposé une équation de régression permettant de calculer (pour ce fourrage théorique) le temps total de mastication /kg MS à l'aide de la teneur en NDF (/kg MS) :

$$\text{Durée mastication} = -97,1 + 3,1 \cdot \text{NDF}$$

$$r^2 = 0,95$$

Avec Durée de mastication en minute par kg MS

NDF en % MS.

Mertens propose également une équation de régression permettant de calculer la durée de mastication /kg NDF à l'aide de la teneur en NDF :

$$\text{Durée de mastication} = 1,5 + 2,37 \cdot \text{NDF}$$

$$r^2 = 0,88$$

Avec Durée de mastication en minute par kg NDF

NDF en % MS.

En utilisant le foin théorique (NDF = 100 %), on trouve des durées de mastication égales à 213 et 239 minutes /kg MS et /kg NDF respectivement, ce qui est assez cohérent avec les 240 minutes de mastication imaginées par Mertens.

Des équations de régression similaires ont été réalisées pour chaque type et forme physique d'aliment. Par comparaison avec le foin imaginaire caractérisé par un peNDF égal à 100 (mastiqué pendant 239 minutes /kg NDF), Mertens a réussi à définir un facteur pef pour chaque aliment, en divisant la pente obtenue pour chaque équation par la pente obtenue pour le foin théorique.

Les observations de Mertens lui permettent de relier le pH ruminal à la valeur peNDF de l'aliment. Sa conclusion est qu'une ingestion de peNDF de 4,4 kg par jour (ou une concentration de 22 % de la MS de la ration) est nécessaire pour maintenir un pH ruminal de 6,0.

Ce système, bien que complexe et donc peu utilisable en routine, est assez performant puisqu'il permet d'effacer les facteurs de variation liés aux animaux (ingestion, taille). La prédiction du pH ruminal n'est pas encore standardisée, mais devrait permettre, en connaissant la valeur peNDF d'un aliment, de déterminer la quantité optimale d'aliment à distribuer quotidiennement pour éviter les risques d'acidose ruminale.

III.7. Le système de valeurs de structure de De Brabander

Les travaux réalisés par l'équipe belge de De Brabander et al. (24-26) ont pour but de proposer un nouveau système pour évaluer la valeur de structure physique des aliments, ainsi que d'envisager différentes techniques de laboratoire permettant de calculer ces valeurs de structure pour tout aliment. Ces valeurs de structure devront ensuite permettre de déterminer les quantités respectives à distribuer de chaque aliment composant la ration afin de répondre

correctement aux exigences des animaux en terme de leur besoin en structure, tout en respectant les besoins en nutriments. Comme nous l'avons précédemment vu, le besoin en structure traduit la composition optimale de la ration permettant un bon fonctionnement ruminal, à l'abri des désordres métaboliques.

La principale différence de ces travaux par rapport aux précédents est que les auteurs ne prennent pas le temps de mastication total de la ration comme seul indicateur de fibrosité de la ration pour plusieurs raisons :

- les valeurs de fibrosité obtenues pour les ensilages de maïs et les ensilages d'herbe contiennent trop de dispersion : les écarts-types sont toujours très élevés
- la mastication ne s'interprète que comme une mesure de l'action des substances tampons dans le rumen à travers l'action de la salive, mais des caractéristiques intrinsèques des aliments (comme le caractère acidogène propre, relié à la composition en glucides rapidement fermentescibles, ainsi qu'un pouvoir tampon intrinsèque propre) ne sont pas du tout pris en charge par la mastication, et sont déterminants dans les calculs de rationnement

Il est nécessaire de donner plusieurs définitions :

- La part minimale de fourrages grossiers :

Expérimentalement, les auteurs ont diminué dans des expérimentations la proportion de fourrage distribué à des vaches laitières. La diminution était hebdomadaire jusqu'à l'apparition de symptômes évoquant un déficit de structure physique chez les animaux, comme par exemple une dépression du taux butyreux du lait, une diminution de production de lait, une chute d'appétit). La proportion distribuée juste avant que ces signes n'apparaissent est appelée la part minimale de fourrage, notée R_{crit} . Donc une faible valeur de R_{crit} indique une valeur de structure élevée pour l'aliment considéré.

- La valeur de structure d'un aliment est une donnée abstraite qui dépasse la seule capacité à stimuler la mastication, puisqu'elle intègre également des caractéristiques des aliments considérés (effet acidogène propre, effet neutralisant propre).

- Le postulat de base de De Brabander est le suivant :

$$\frac{R_{crit}}{1000} . VS_R + \frac{C_{crit}}{1000} . VS_C = 1 / kg . MS$$

Avec R_{crit} = Part minimale de fourrage en g/kg de ration

VS_R = Valeur de structure du fourrage, /kg MS

$C_{crit} = R_{crit} - 1$

VS_C = Valeur de structure du concentré

A l'issue de ces travaux de recherche, De Brabander est en mesure de proposer des méthodes de calcul des valeurs de structure des aliments les plus couramment utilisés. Ces équations sont reportées dans le tableau 11.

Produits dérivés de l'herbe	
Ensilage d'herbe	
$VS = -0,20 + 0,0125.CB$ (% MS)	$r^2 = 0,40$
$VS = 0,15 + 0,0060.NDF$ (% MS)	$r^2 = 0,26$
Foin	
Équation de l'ensilage d'herbe avec CB, * 1,06	
Équation ensilage d'herbe avec NDF, sans correction	
Ensilage de maïs	
$VS = -0,10 + 0,0090.CB$ (% MS)	$r^2 = 0,26$
$VS = -0,57 + 0,0060.NDF$ (% MS)	$r^2 = 0,33$
Correction à apporter selon la taille de coupe : +(-) 2% / +(-) 1 mm de longueur	
Paille	
$VS = 4,30$	

Tableau 11 : Valeurs de structure de quelques aliments couramment utilisés.

D'après (26).

Pour les aliments concentrés, il existe aussi des relations faisant intervenir la teneur en NDF, le taux d'amidon dégradable, le taux d'amidon by-pass et le taux de sucres.

L'intérêt majeur de ces travaux est que tout aliment a une valeur de structure propre, dont le calcul est basé sur de formules données dans des tables. Cependant, il faut remarquer que les coefficients de détermination obtenus pour le calcul des valeurs de structure sont relativement bas, ce qui fait que le système n'est pas parfait.

La formule postulée par De Brabander correspond à un besoin de structure pour une vache dite standard, c'est-à-dire qui produit 25 kg de lait à 4,4 % de TB, qui est en 1^{re}, 2^{ème} ou 3^{ème} lactation, et qui reçoit ses concentrés en 2 repas. Pour cette vache, le besoin de structure vaut 1 / kg MS (postulat de l'équation de De Brabander).

Pour étendre l'étude à n'importe quelle vache laitière, il convient d'apporter des coefficients correcteurs.

- Production de lait et de matières grasses :
 - $\pm 0,01$ par kg de lait en plus ou en moins par rapport au standard de 25 kg.
 - $\pm 0,05$ par % de TB en plus ou en moins par rapport au standard de 4,4%

- Age
 - - 0,07 pour une vache en 4^{ème} lactation.
 - - 0,15 pour une vache en 5^{ème} lactation.

- Concentré

Une réduction de 0,10 est proposée lorsque la distribution de concentrés est étalée (au moins 6 fois par jour).

Avec ces corrections apportées en fonction de l'animal, le besoin en structure est modifié, il s'écarte un peu de la valeur standard de 1 / kg MS.

En posant $R_{crit} = x$, on obtient $C_{crit} = 1-x$. Il suffit alors de résoudre l'équation à une inconnue pour obtenir la valeur x , soit la part minimale de fourrage à intégrer à la ration.

Ce système semble être le plus adapté parmi tous ceux envisagés pour plusieurs raisons. En premier lieu, tous les facteurs de variation cités dans la deuxième partie sont pris en compte. De plus, ce système est réellement adapté aux animaux (les corrections apportées permettent de différencier les besoins des animaux), et adapté également aux aliments, puisque la valeur

de structure est calculée différemment pour chaque type d'aliment, ce qui évite les problèmes induits par les généralisations et les régressions trop générales. En particulier, pour l'ensilage de maïs, l'auteur a respecté le fait que la longueur des brins joue un rôle important dans l'évaluation de la structure physique (24), alors que pour l'ensilage d'herbe (la longueur des brins de cet aliment influe peu sur la valeur de structure (25)), cette correction n'apparaît pas.

III.8. Les recommandations ITCF (Institut Technique des Concentrés et Fourrages) (42)

Ces recommandations concernent exclusivement l'ensilage de maïs, et sont issues d'observations pratiques. L'ITCF propose d'évaluer la structure physique de l'ensilage de maïs, et donne des recommandations quant à la forme physique de l'ensilage.

La technique utilisée par l'ITCF est un tamisage à sec de l'ensilage, à travers trois grilles successives avec des mailles de 2 cm, 1 cm et 0,5 cm. Le tamisage de l'ensilage fait donc apparaître quatre fractions :

- Les éléments de taille supérieure à 2 cm (éléments grossiers)
- Les éléments de taille comprise entre 1 et 2 cm (éléments moyens)
- Les éléments de taille comprise entre 0,5 et 1 cm (éléments fins)
- Les éléments de taille inférieure à 0,5 cm (éléments très fins)

Chaque fraction est pesée et exprimée en pourcentage du poids total de l'ensilage. Le Tableau 12 présente les recommandations ITCF pour l'ensilage de maïs.

Particules de l'ensilage de maïs	Recommandations (% de l'ensilage)
Éléments grossiers (> 2cm)	0 à 5 %
Éléments moyens (1 à 2 cm)	15 à 20 %
Éléments fins (0,5 à 1 cm)	45 à 55 % (voire plus)
Éléments très fins (< 0,5 cm)	20 à 35 % (voire moins)

Tableau 12 : Les recommandations ITCF pour l'ensilage de maïs. D'après (42).

Un des avantages de cette méthode est la simplicité de l'évaluation de la fibrosité de l'ensilage. De plus, cette évaluation de la fibrosité seulement par la forme physique de

l'ensilage est acceptable, parce que, comme nous l'avons déjà vu (cf. II.2.1.3. Influence de la nature du fourrage), De Boever et al. (24) ont montré que la fibrosité de l'ensilage de maïs était très fortement liée à la taille des particules.

Cependant, cette méthode de tamisage peut se révéler insuffisante pour plusieurs raisons :

- Premièrement la technique de tamisage n'est pas standardisée, et une agitation trop longue des grilles peut conduire à un biais dans le résultat du fait du passage « forcé » de certaines particules à travers les grilles. Une certaine habitude est donc requise pour utiliser convenablement le tamis, mais cela ne semble pas illusoire.
- Deuxièmement elle n'est valable que pour l'ensilage de maïs, et elle ne permet pas d'évaluer la fibrosité d'une ration mélangée. Des essais ont été réalisés par l'ITCF pour donner des recommandations de taille de particules dans le cas d'une ration à base d'ensilage de maïs, mais elle est peu intéressante, parce que la qualité du foin n'est pas du tout prise en compte, ni la proportion de foin ou de concentrés intégrés à la ration.

CONCLUSION

Les modalités pratiques permettant d'évaluer la fibrosité d'un aliment et des régimes restent assez discutés jusqu'à présent. L'importance économique de ce thème a conduit beaucoup d'équipes dans le monde à travailler sur le sujet depuis une trentaine d'années maintenant.

La nécessité de quantifier la fibrosité et d'en faire une contrainte alimentaire courante lors de la réalisation de rations a conduit à des approximations retrouvées aujourd'hui sur le terrain. La fibrosité s'est banalisée dans les pratiques de rationnement, des systèmes (comme la mesure de NDF dans la ration, ou le taux de CB corrigé par la taille des particules) sont utilisés sans qu'il n'y ait eu véritablement de méthode officiellement reconnue comme satisfaisante. De plus, les modalités qui font de la fibrosité un critère hygiénique alimentaire (c'est-à-dire la production de substances tampons pour le rumen) ne sont pas clairement exposées dans la littérature contemporaine.

Parmi les différents systèmes, le seul qui paraît prendre conscience de toutes ces lacunes est celui de l'équipe belge de De Brabander, dans lequel tous les aliments sont pris séparément suivant leur type, leur taille de coupe, leur modes de conservation. Les exigences des animaux sont analysées individuellement en fonction de critères propres (production, rang de lactation). Le facteur limitant de ce système réside cependant dans le calcul des valeurs de structure qui paraît approximatif. Il semble en effet qu'à l'heure actuelle, la recherche de généralisation d'une loi valable pour une catégorie d'aliments à tous les autres aliments est génératrice d'approximation. Les équations de régression engendrent nécessairement un écart par rapport à la réalité et définir une seule loi pour tous les aliments paraît illusoire.

L'avenir de la fibrosité réside donc peut-être dans la réalisation de tables les plus exhaustives possibles donnant les valeurs de fibrosité des aliments courants, grâce à des calculs suivant les caractéristiques de l'aliment. Des méthodes doivent être standardisées pour vérifier les résultats obtenus et déterminer les équations nécessaires au calcul de la fibrosité d'une ration à partir de celle des aliments qui la composent.

AGREMENT ADMINISTRATIF

Je soussigné, M. BONNES, Directeur par intérim de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, certifie que
M. MARTIN Sébastien, Nicolas
a été admis(e) sur concours en : 1996
a obtenu son certificat de fin de scolarité le : 9 juillet 2001
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

AGREMENT SCIENTIFIQUE

Je soussigné, F. ENJALBERT, Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,
déclare que j'ai lu la thèse de :
M. MARTIN Sébastien, Nicolas
intitulée :
"Influence de la fibrosité de la ration dans la prévention de l'acidose chez la vache laitière"
et que je prends la responsabilité de l'impression.

**Le Professeur
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse**



Professeur Francis ENJALBERT

**Vu :
Le Directeur par intérim
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse**



Professeur Gilbert BONNES

**Vu :
Le Président de la thèse :**



Professeur Henri DABERNAT

**Vu le : 20 Décembre 2001
Le Président
de l'Université Paul Sabatier**



Professeur Raymond BASTIDE



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Allen, M.S.** 1997. Relationship between fermentation acid production in the rumen and the requirement for physically effective fiber. *J. Dairy Sci.* **80**:1147-1462.
2. **Archimède, H., D. Sauvant, and P. Schmidely.** 1997. Quantitative review of ruminal and total tract digestion of mixed diet organic matter and carbohydrates. *Reprod. Nutr. Dévelop.* **37**:173-189.
3. **Bae, D.H., J.G. Welch, and B.E. Gilman.** 1983. Efficiency of mastication in relation to hay intake by cattle. *J. Anim. Sci.* **66**:2137-2141.
4. **Bae, D.H., J.G. Welch, and A.M. Smith.** 1981. Efficiency of mastication in relation to hay intake by cattle. *J. Anim. Sci.* **52**:1371-1375.
5. **Bailey, C.B.** 1961. Saliva secretion and its relation to feeding in cattle. 3. The rate of secretion of mixed saliva in the cow during eating with an estimate of the magnitude of total daily secretion of mixed saliva. *Br. J. Nutr.* **15**:443-455.
6. **Bailey, C.B. and C.C. Balch.** 1961. The digestion of hay administered to cows through rumen fistulas. *Br. J. Nutr.* **15**:183-188.
7. **Bailey, C.B. and C.C. Balch.** 1961. Saliva secretion and its relation to feeding in cattle. 1. The composition and rate of secretion of parotid saliva in a small steer. *Br. J. Nutr.* **15**:371-382.
8. **Bailey, C.B. and C.C. Balch.** 1961. Saliva secretion and its relation to feeding in cattle. 2. The composition and rate of secretion of mixed saliva in the cow during rest. *Br. J. Nutr.* **15**:383-395 .
9. **Balch, C.C.** 1971. Proposal to use time spent chewing as an index of the extent to which diets for ruminants possess the physical property of fibrousness characteristics of roughages. *Br. J. Nutr.* **26**:383-392.

10. **Beauchemin, K.A.** 1991. Effects of dietary neutral detergent fiber concentration and alfalfa hay quality on chewing, rumen function, and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* **74**:3140-3151.
11. **Beauchemin, K.A.** 1991. Ingestion and mastication of feed by dairy cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice.* **7 (n°2)**:439-451 .
12. **Beauchemin, K.A. and J.G. Buchanan-Smith.** 1989. Effects of dietary neutral detergent fiber concentration and supplementary long hay on chewing activities and milk production of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **72**:2288-2300.
13. **Bouisset, S.** 1998. Acidoses nutritionnelles chez la vache laitière: aspects cliniques, conséquences sur la production et la reproduction. *Atti della Società Italiana di Buiatria. Vol XXX*:482-503.
14. **Brugère-Picoux, J.** 1983. Biochimie du rumen, aspects pathologiques. *G.T.V.* **3B-255**:27-50.
15. **Brugère-Picoux, J., H. Brugère, and H. Le Bars.** 1979. Perturbations de la digestion microbienne chez les ruminants: étiologie, pathogénie, étude clinique, déductions thérapeutiques. *Rec. Méd. Vét.* **155 (5)**:479-494.
16. **Campling, R.C.** 1966. The intake of hay and silage by cows. *J. Br. Grassland Soc.* **21**:41-48.
17. **Campling, R.C. and M. Freer.** 1966. Factors affecting the voluntary intake of food by cows. 8. Experiments with ground, pelleted roughages. *Br. J. Nutr.* **20**:229-244.
18. **Carter, R.R. and W.L. Grovum.** 1990. A review of the physical significance of hypertonic body fluid on feed intake and ruminal function: salivation, motility and microbes. *J. Anim. Sci.* **68**:2811-2832.
19. **Cassida, K.A. and M.R. Stokes.** 1986. Eating and resting salivation in early lactation dairy cows. *J. Dairy Sci.* **69**:1282-1292.
20. **Church, D.C.** 1988. Salivary function and production. *In* : *The Ruminant Animal: Digestive Physiology and Nutrition.* D. C. Church, U.S.A.

21. **Clark, P.W. and L.E. Armentano.** 1999. Influence of particle size on the effectiveness of the fiber in corn silage. *J. Dairy Sci.* **82**:581-588.
22. **Counotte, G.H.M., A.T. Van't Klooser, J. Van der Kuilen, and R.A. Prins.** 1979. An analysis of the buffer system in the rumen of dairy cattle. *J. Anim. Sci.* **49**:1536-1544.
23. **De Boever, J.L., J.I. Andries, D. De Brabander, B.G. Cottyn, and F.X. Buysse.** 1990. Chewing activity of ruminants as a measure of physical structure. A review of factors affecting it. *Animal Feed Science and Technology.* **27**:281-291.
24. **De Boever, J.L., D. De Brabander, A.M. DeSmet, J.M. Vanacker, and CH.V. Boucqué.** 1993. Evaluation of physical structure. 2. Maize silage. *J. Dairy Sci.* **76**:1624-1634.
25. **De Boever, J.L., A.M. DeSmet, D. De Brabander, and CH.V. Boucqué.** 1993. Evaluation of physical structure. 1. Grass silage. *J. Dairy Sci.* **76**:140-153.
26. **De Brabander, D., J.L. De Boever, J.M. Vanacker, CH.V. Boucqué, and S.M. Botterman.** 1999. Evaluation of physical structure in dairy cattle nutrition. 33rd Feed Manufacturers Conference 1999, Nottingham (UK), 5-7. In: *Recent Advantages in Animal Nutrition 1999.*
27. **Dijkstra, J., H. Boer, J. Van Brucke, M. Bruining, and S. Tamminga.** 1993. Absorption of volatile fatty acids from the rumen of lactating dairy cows as influenced by volatile fatty acid concentration, pH and rumen liquid volume. *Br. J. Nutr.* **69**:385-396.
28. **Dulphy, J.P.** 1971. Influence du poids vif et du niveau d'ingestion sur le comportement alimentaire et mérycique du mouton. *Ann. Zootech.* **20**:477-486.
29. **Dulphy, J.P. and G. Bechet.** 1976. Influence du stade de végétation et de l'espèce végétale sur le comportement alimentaire et mérycique des moutons recevant des fourrages verts hâchés. *Ann. Zootech.* **25**:505-519.
30. **Dulphy, J.P., J. Rouel, and M. Jailler.** 1996. Influence du niveau croissant d'apport d'aliment concentré sur la durée de mastication de la ration chez la vache laitière. *Ann Zootech.* **45**:343-348.

31. **Dulphy, J.P., J. Rouel, M. Jailler, and D. Sauvant.** 1993. Données complémentaires sur les durées de mastication chez des vaches laitières recevant des rations riches en fourrage: influence de la nature du fourrage et du niveau d'apport d'aliment concentré. *INRA Prod. Anim.* **6**:297-302.
32. **Elam, C.J.** 1976. Acidosis in feedlot cattle: practical observations. *J. Anim. Sci.* **43** No **4**:898-901.
33. **Erdman, R.A.** 1988. Dietary buffering requirements of the lactating dairy cow: A review. *J. Dairy Sci.* **71**:3246-3266.
34. **Espinasse, J.** 1969. Les indigestions des bovins adultes. 1. Etiologie et pathogénie. *Revue Med. Vét.* **120**;7:615-642.
35. **Freer, M. and R.C. Campling.** 1965. Factors affecting the voluntary intake of food by cows. 7. The behavior and reticular motility of cows given diets of hay, dried grass, concentrate and ground, pelleted hay. *Br. J. Nutr.* **19**:195-207.
36. **Freer, M., R.C. Campling, and C.C. Balch.** 1962. Factors affecting the voluntary intake of food by cows. 4. The behaviour and reticular motility of cows receiving diets of hay, oat straw and oat straw with urea. *Br. J. Nutr.* **16**:279-295.
37. **Grant, R.J., V.F. Colenbrander, and D.R. Mertens.** 1990. Milk fat depression in dairy cows: role of silage particle size. *J. Dairy Sci.* **73**:7:1834-1842.
38. **Guérin, H. and J.P. Dulphy.** 1984. Influence de l'apport complémentaire de maïs, de pulpe de betterave ou de mélasse sur la valeur alimentaire d'un foin. *Ann. Zootech.* **33**:509-532.
39. **Heinrichs, A.J., D.R. Buckmaster, and B.P. Lammers.** 1999. Processing, mixing, and particle size reduction of forages for dairy cattle. *J. Anim. Sci.* **77**:180-186.
40. **Horn, G.W., J.L. Gordon, E.C. Prigge, and F.N. Owens.** 1979. Dietary buffers and ruminal and blood parameters of subclinical lactic acidosis in steers. *J. Anim. Sci.* **48**:683-691.

41. **Huber, T.L.** 1976. Physiological effects of acidosis on feedlot cattle. *J. of Anim. Sci.* **43** No 4:902-909.
42. **ITCF - AGPM.** Non daté. Finesse de hachage de l'ensilage de maïs. Brochure d'information.
43. **Jarrige, R.** 1978. Consommation d'aliments et d'eau. *In* : Alimentation des ruminants. INRA publications, pp 177-206, Versailles.
44. **Journet, M.** 1988. Optimisation des rations. *In* : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Ed. R. Jarrige, INRA; pp 121-133, Paris.
45. **Journet, M., G. Huntington, and J.L. Peyraud.** 1995. Le bilan des produits terminaux de la digestion. *In* : Nutrition des Ruminants Domestiques. INRA éditions; pp 671-720, Paris.
46. **Kaiser, R.M. and D.K. Combs.** 1989. Utilization of three maturities of alfalfa by dairy cows fed rations that contain similar concentration of fiber. *J. Dairy Sci.* **72**:2301-2307.
47. **Kaufmann, W.** 1976. Influence of the composition of the ration and the feeding frequency on pH-regulation in the rumen and on feed intake in ruminants. *Livest. Prod. Sci.* **3**:103-114.
48. **Kawas, J.R., N.A. Jorgensen, and J.L. Danelon.** 1991. Fiber requirements of dairy cows: optimum fiber level in lucerne-based diets for high producing cows. *Livestock Production Science* **28**:107-119.
49. **Kay, R.N.B.** 1966. The influence of saliva on digestion in ruminants. *Wld. Rev. Nutr. and Diet* **6**:292-325.
50. **Kuehn, C.S., J.G. Linn, and H.G. Jung.** 1997. Effect of corn silage chop length on intake, milk production, and milk composition of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **80** Suppl 1:219-219.
51. **Le Liboux, S. and J.L. Peyraud.** 1998. Effect of particle size and intake level on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets. *Animal feed science and technology.* **73**:131-150.

52. **Le Liboux, S. and J.L. Peyraud.** 1999. Effect of forage particle size and feeding frequency on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed mixed diets. *Animal feed science and technology.* **76**:297-319.

53. **Malbert, C.H., Y. Ruckebusch, L. Buéno, R. Baumont, V. Théodorou, and P. Brikas.** 1995. Motricité du complexe gastrique. *In* : Nutrition des Ruminants Domestiques. INRA, Paris.

54. **Mertens, D.R.** 1983. Using neutral detergent fiber to formulate dairy rations and estimate the net energy content of forages. *Proc. Cornell Nutr Conf, Ithaca, NY* 60-82.

55. **Mertens, D.R.** 1997. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. *J. Dairy Sci.* **80**:1463-1481.

56. **Michalet-Doreau, B. and D. Sauvant.** 1989. Influence de la nature du concentré, céréale ou pulpe de betteraves sur la digestion chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.* **2**:

57. **Norgaard, P.** 1989. Influence of the physical form of diet on chewing activity and reticulo-rumen motility in cows. *Acta Vet. Scand. Suppl. n°86*:46-52.

58. **Norgaard, P.** 1993. Saliva secretion and Acid-base status of ruminants: A review. *Acta vet. scand. Suppl.* **89**:93-100.

59. **O'Dell, G.D., W.A. King, and W.C. Cook.** 1968. Effect of grinding, pelleting, and frequency of feeding of forage on fat percentage of milk and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* **51**:50-55.

60. **Owens, F.N., D.S. Secrist, W.J. Hill, and D.R. Gill.** 1998. Acidosis in cattle: A review. *J. Anim. Sci.* **76**:275-286.

61. **Robinson, P.H. and R.E. McQueen.** 1997. Influence of level of concentrate allocation and fermentability of forage fiber on chewing behavior and production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* **80**:681-691.

62. **Ruckebusch, Y.** 1988. Motility of the gastro-intestinal tract. *In* : The Ruminant Animal: Digestive Physiology and Nutrition. D. C. Church, United States of America.

63. **Santini, F.S., A.R. Hardie, N.A. Jorgensen, and M.F. Finner.** 1983. Proposed use of adjusted intake based on forage particle length for calculation of roughages indexes. *J. Dairy Sci.* **66**:811-820.
64. **Sauvant, D.** 1992. Compléments sur la fibrosité des rations des ruminants. Journées CAAA-AFTAA, Tours, 26-27/02/1992
65. **Sauvant, D., J.P. Dulphy, and B. Michalet-Doreau.** 1990. Le concept d'indice de fibrosité des aliments des ruminants. *INRA Prod. Anim.* **3 (5)**:309-318.
66. **Sauvant, D., E. Grenet, and M. Doreau.** 1995. Dégradation chimique des aliments dans le réticulo-rumen: cinétique et importance. *In : Nutrition des Ruminants Domestiques.* INRA éditions; pp 383-406, Paris.
67. **Sauvant, D., F. Meschy, and D. Mertens.** 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *INRA Prod. Anim.* **12 (1)**:49-60.
68. **Shaver, R.D., A.J. Nytes, L.D. Satter, and N.A. Jorgensen.** 1986. Influence of amount of feed intake and forage physical form on digestion and passage of prebloom alfalfa hay in dairy cows. *J. Dairy Sci.* **69**:1545-1559.
69. **Shriver, B.J., W.H. Hoover, J.P. Sargent, R.J. Crawford Jr, and W.V. Thayne.** 1986. Fermentation of a high concentrate diet as affected by ruminal pH and digesta flow. *J. Dairy Sci.* **69**:413-419.
70. **Slyter, L.L.** 1976. Influence of acidosis on rumen function. *J. of Anim. Sci.* **43 n°4**:910-929.
71. **Sudweeks, E.M., L.O. Ely, D.R. Mertens, and L.R. Sisk.** 1981. Assessing minimum amounts and form of roughages in ruminant diets: roughage value index system. *J. Anim. Sci.* **53**:1406-1411.
72. **Sudweeks, E.M., L.O. Ely, and L.R. Sisk.** 1980. Effect of intake on chewing activity of steers. *J. Dairy Sci.* **63**:152-154.
73. **Sudweeks, E.M., M.E. Mc Cullough, L.R. Sisk, and S.E. Law.** 1975. Effects of concentrate type and level and forage type on chewing time of steers. *J. Anim. Sci.* **41**:219-224.

74. **Thivend, P., G. Fonty, J.P. Jouany, M. Durand, and Ph. Gouet.** 1985. Le fermenteur rumen. *Reprod. Nutr. Dévelop.* **25 (4B):**729-753.
75. **Wangness, P.J. and L.D. Muller.** 1981. Maximum forage for dairy cows: Review. *J. Dairy Sci.* **64:**1-13.
76. **Welch, J.G.** 1982. Rumination, particle size, and passage from the rumen. *J. Anim Sci.* **54:**885-890.
77. **Welch, J.G. and A.M. Smith.** 1969. Influence of forage quality on rumination time in sheep. *J. Anim. Sci.* **28:**813-819.
78. **Wolter, R.** 1997. *Alimentation de la vache laitière.* Editions France Agricole, Reprint: 97.
79. **Woodford, J.A., N.A. Jorgensen, and G.P. Barrigton.** 1986. Impact of dietary fiber and physical form on performance of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* **69:**1035-1047.
80. **Woodford, S.T. and M.R. Murphy.** 1988. Effect of forage physical form on chewing activity, dry matter intake, and rumen function of dairy cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* **71:**674-686.

