

LA DIGESTION RUMINALE DES AMIDONS : CINÉTIQUE ET APPLICATIONS

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ÉTAT

*présentée et soutenue publiquement en 2001
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Frédéric, Henri CHEVALLIER
Né, le 12 novembre 1968 à LYON (Rhône)

Directeur de thèse : M. le Professeur ENJALBERT

JURY

PRESIDENT :
M. THOUVENOT

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :
M. BERTHELOT

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. PAVAU
	M.	F. LESCURE
	M.	A. RICO

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **CABANIE Paul**, Histologie, Anatomie pathologique
- M. **CAZIEUX André, (sur nombre)** Pathologie chirurgicale
- 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. **BENARD Patrick**, Physique et Chimie biologiques et médicales
- M. **BODIN ROZAT DE MANDRES NEGRE Guy**, Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie
- M. **BRAUN Jean-Pierre**, Physique et Chimie biologiques et médicales
- M. **CHANTAL Jean**, Pathologie infectieuse
- M. **DARRE Roland**, Productions animales
- 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. **GRIESS Daniel**, Alimentation
- 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
- M. **LIGNEREUX Yves**, Anatomie
- M. **MARTINEAU Guy**, Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour
- M. **PICAVET Dominique**, Pathologie infectieuse
- M. **SCHELCHER François**, Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour

PROFESSEUR CERTIFIE 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 Erick**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **BENNIS- BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
Mme **BOUCRAUT-BARALON Corine**, *Pathologie infectieuse*
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
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**, *Zootchnie*
M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
Mlle **GAYRARD Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **MESSUD-PETIT Frédérique**, *Pathologie infectieuse*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
M. **VALARCHER Jean-François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

MAITRES DE CONFERENCES 2^e CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
Mlle **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie du Bétail*
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
Mlle **HAY Magali**, *Zootchnie*
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
Mlle **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Productions animales*
M. **MAREDA Marc**, *Pathologie de la Reproduction*
Mlle **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
M. **MONNEREAU Laurent**, *Anatomie, Embryologie*

A notre Président du jury de Thèse,

Monsieur le professeur THOUVENOT,

Professeur des Universités

Biochimie

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

Aux membres de notre Jury de Thèse,

Monsieur le Professeur Francis ENJALBERT

de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Alimentation

Merci pour ce sujet passionnant et pour être toujours resté à l'écoute de mes préoccupations

Qu'il reçoive ici toute ma reconnaissance,

Monsieur le Professeur Xavier BERTHELOT

de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pathologie de la Reproduction

qui m'a fait l'honneur de participer à notre jury de thèse

A mes parents,
sans le soutien desquels je n'aurais pu réaliser ce rêve;
merci pour l'amour qu'ils m'ont apporté tout au long de mes
études.

Que ces quelques mots soient l'expression de ma profonde
reconnaissance.

A Thierry,
mon grand frère, pour cette complicité qui nous unit et qui,
j'espère, nous unira toujours.

A Denise, Pierre-Alexandre, et Lise-Adeline,
pour l'affection qu'ils me témoignent.

A mes grands-parents,
en souvenir des bons moments partagés avec eux.

A ma marraine, mon parrain, et tous mes cousins.

A Jean-François et Marie-Christine Demeulemeester, et
Stéphane,
pour les sentiments qu'ils me témoignent,
et pour avoir mis à ma disposition leurs compétences et
matériel informatiques pour la rédaction de cette thèse.

Aux grand-parents, oncles, tantes, et cousins d'Hélène,
pour les bons moments passés à leurs côtés et ceux à venir.

A Madame Crespy,
en mémoire de sa grande bonté.

A tous mes amis, sans oublier ceux qui sont loin:
les vétos, pour tous ces moments inoubliables partagés pendant
ces années d'études toulousaines;
le "noyau" de la prépa, pour avoir "souffert" (et aussi bien déliré
parfois!) dans la même "galère";
et tous mes amis "extra-scolaires", pour les moments forts vécus
ensemble.

Aux Sawroz's, avec une nostalgie certaine.

Aux confrères Jacques Amouroux, Alain Bichot, et Jean-Philippe
Bouche,
qui m'ont, chacun, beaucoup appris dans l'exercice de cette
merveilleuse profession, et accueilli chaleureusement dans
leurs familles.

A Frou, Texan, Panthère, Pupupe, Pitou, Black, Dalton, Jocker,
Galik, Oslo, Nolly, Rainette, Platon, Petra,

A Hélène,
pour tout l'amour qu'elle m'apporte chaque jour,
et aussi pour toutes les heures qu'elle a passées devant
l'ordinateur pour la rédaction de cette thèse.

“Le progrès scientifique est probablement sans limites; à nous, êtres humains, d’essayer de l’exploiter au mieux; si l’on pouvait penser un peu plus à ceux qui viendront après nous.....”

LA DIGESTION RUMINALE DES AMIDONS:
CINETIQUE ET APPLICATIONS

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	p 3
<u>I- BASES PHYSIOLOGIQUES</u>	p 4
<u>A- LA MICROPOPULATION RUMINALE</u>	p 5
1- La micropopulation bactérienne	p 7
2- Les protozoaires	p 12
3- Les champignons	p 13
<u>B- LES DIFFERENTS GLUCIDES DANS L'ALIMENTATION DES RUMINANTS</u>	p 15
1- Les glucides pariétaux (structuraux)	p 16
2- Les glucides cytoplasmiques	p 18
<u>C- VOIES BIOCHIMIQUES DE LA DEGRADATION DES GLUCIDES</u>	p 21
1- Principes de la dégradation ruminale des glucides	p 22
2- Cascades de réactions biochimiques et production d'AGV	p 23
3- Facteurs influençant la production d'AGV et de gaz	p 28
<u>II- ETUDE CINETIQUE</u>	p 34
<u>A- DONNEES EXPERIMENTALES ET MODELES MATHEMATIQUES</u>	p 35
1- Méthodes d'étude	p 35
2- Résultats et modèles mathématiques	p 36
<u>B- FACTEURS DE VARIATIONS</u>	p 44
1- Influence minime de la nature de l'amidon	p 44
2- Rôle prépondérant de la structure de l'endosperme	p 45
3- Influence des traitements mécaniques	p 52

4- Influence des traitements physiques	p 57
5- Influence des traitements chimiques	p 60
6- Facteurs de variation extrinsèques	p 66
<u>III- APPLICATIONS</u>	p 71
<u>A- APPLICATIONS NUTRITIONNELLES</u>	p 72
1- Intérêt d'optimiser la digestion ruminale de l'amidon	p 72
2- Limites à la digestion massive de l'amidon dans le rumen	p 75
3- Optimisation de la digestion dans l'intestin grêle	p 77
<u>B- CONSEQUENCES METABOLIQUES</u>	p 82
1- Animaux à l'engraissement	p 82
2- Production laitière	p 82
<u>C- APPLICATIONS PRATIQUES</u>	p 85
1- Choix de la source d'amidon	p 85
2- Association des concentrés énergétiques et azotés	p 91
3- Modes de distribution	p 94
<u>CONCLUSION</u>	p 100
<u>TABLE DES ILLUSTRATIONS</u>	p 101
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	p 105

INTRODUCTION

Avec l'augmentation du niveau de production, les ruminants ont des besoins nutritionnels de plus en plus élevés. Pour couvrir de tels besoins, étant donné que leur capacité d'ingestion ne peut augmenter indéfiniment, on incorpore à la ration de base des aliments dits "concentrés" énergétiques ou azotés, appelés ainsi parce qu'ils présentent une valeur nutritionnelle élevée avec un encombrement moindre. Parmi les concentrés énergétiques, qui permettent d'augmenter la densité énergétique de la ration, les plus utilisés actuellement sont ceux qui sont riches en amidon, et en particulier les céréales. Mais la nutrition d'un ruminant passe avant tout par les fermentations et les synthèses microbiennes qui se déroulent dans le rumen (à l'issue desquelles l'animal pourra absorber les nutriments fournis par cette micropopulation), celles-ci étant susceptibles d'être perturbées par la distribution de tels aliments. Par conséquent, et aussi pour mieux comprendre comment ces aliments sont assimilés par l'animal, il est nécessaire de prendre en compte toute cette activité microbienne ruminale et de connaître ses mécanismes.

Après avoir présenté les principales caractéristiques de ces aliments et rappelé les grands principes de la digestion chez les ruminants et notamment les phénomènes qui se déroulent dans le rumen, nous étudierons les modalités de dégradation ruminale de l'amidon et en particulier ses aspects cinétiques. Nous verrons alors les nombreuses variations de cette dégradation, dont nous étudierons les causes, et enfin nous essaierons de voir les applications que l'on peut retirer de tous ces phénomènes sur un plan nutritionnel, métabolique, ainsi que les applications pratiques.

I- BASES
PHYSIOLOGIQUES

A- LA MICROPOPULATION RUMINALE

L'existence d'une microflore ruminale, responsable des fermentations dans le rumen, était déjà évoquée en 1685 par Peyer, puis en 1843 Gruby et Delafond découvrent les protozoaires. Enfin, Pasteur démontre en 1863 le rôle des bactéries (29). Les champignons, quant à eux, ont été découverts beaucoup plus récemment (Orpin 1975)(89) et leur rôle n'est pas encore précisément connu.

L'écosystème ruminal est un milieu anaérobie où la température est de 39 à 40°C, le pH oscille physiologiquement entre 5,5 et 7, et où il y a environ 85% d'humidité (93)(6).

On dénombre, dans le rumen(24)(29):

- . environ 10^9 à 10^{10} bactéries/ml avec une soixantaine d'espèces, représentant à peu près la moitié de la biomasse du rumen.
- . environ 10^6 protozoaires ciliés/ml, qui ne seraient pas indispensables à la survie des ruminants, mais qui représentent une biomasse importante car leur taille est très supérieure à celle des bactéries.
- . quelques champignons (autour de 10^3 /ml)(6), mais l'estimation de leur nombre reste difficile (89).

L'intérêt principal de cette micropopulation est la dégradation des glucides pariétaux qui ne peuvent être dégradés par les enzymes des êtres vivants supérieurs, ainsi que la synthèse de protéines à haute valeur nutritionnelle et de vitamines.

On distingue trois localisations ruminales de cette micropopulation:

- . adhérente à la paroi ruminale
- . libre dans le jus de rumen
- . adhérente aux particules alimentaires

A l'échelle du rumen, malgré quelques relations d'antagonisme, de compétition voire de prédation entre espèces, ces différentes populations vivent en symbiose. En effet les espèces "hydrolytiques" permettent la dépolymérisation

des glucides complexes en oses simples, repris alors par les espèces "fermentatives" qui les transforment en acides gras volatils (AGV); ce premier groupe fournissant de l'énergie; parallèlement, les espèces "protéolytiques", "uréolytiques" et "désaminantes" permettent de fournir de l'ammoniaque et des acides aminés (18)(29).

Et, c'est l'union des deux qui permet d'assurer les synthèses microbiennes nécessaires au renouvellement de la micropopulation ruminale.

Notons aussi l'importance des bactéries méthanogènes qui utilisent le dihydrogène (H_2) et le dioxyde de carbone (CO_2) libérés lors des fermentations permettant d'augmenter le rendement de celles-ci en évitant un "cul de sac biochimique" (29).

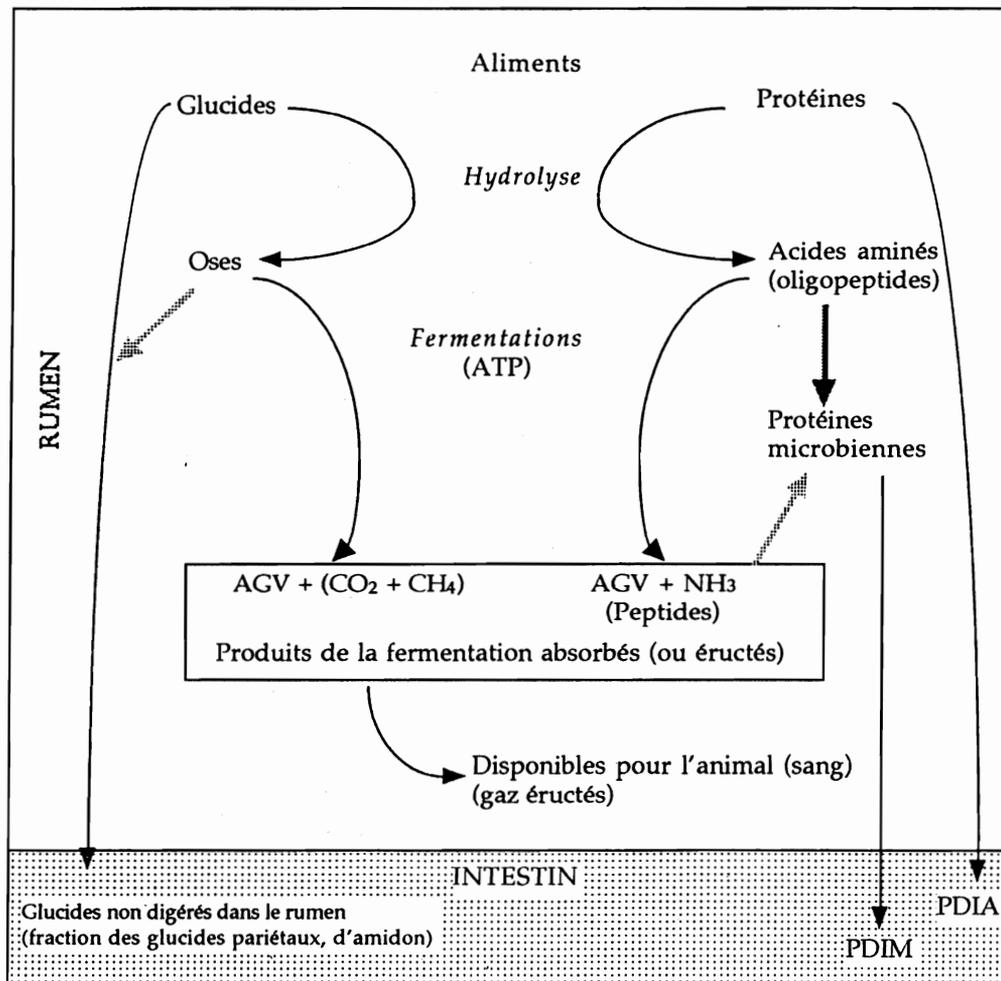


Figure 1: Schéma récapitulatif de la digestion dans le rumen (42)

1- La micropopulation bactérienne:

Ces bactéries sont réparties en une soixantaine d'espèces, certaines très spécialisées et étroitement dépendantes d'autres microbes et d'autres métabolisant de nombreux substrats différents.

a- Les bactéries hydrolytiques

Elles sont généralement attachées aux particules alimentaires.

• Les bactéries cellulolytiques:

Elles sont très importantes car l'hôte ne possède pas les enzymes lui permettant de digérer les glucides pariétaux.

Déjà présentes à 3-4j chez le jeune pré-ruminant (29), elles font partie de la flore adhérente aux particules alimentaires (6)(29) ce qui leur permet d'augmenter leur temps de rétention dans le rumen donc leur temps d'action. Ces bactéries libèrent des enzymes extracellulaires pour dégrader les parois végétales. Elles se développent à $\text{pH} > 6$, et produisent surtout de l'acide acétique (C2) et butyrique (C4). Elles sont très dépendantes de l'ammoniaque pour leur croissance car n'ont qu'une faible action protéolytique (29)(64).

On note quatre espèces principales (29):

. *Fibrobacter succinogenes* et *Butyrivibrio fibrosolvans* qui attaquent les végétaux par érosion des surfaces, sur des parois déjà endommagées.

. *Ruminococcus albus* et *Ruminococcus flavefaciens* qui attaquent les parois végétales par "tunnelling", c'est-à-dire en s'enfonçant dans ces parois.

Ces bactéries à rôle hydrolytique (qui ont donc pour fonction de dégrader les polysaccharides pariétaux) libèrent des enzymes extracellulaires qui attaquent les polymères et les réduisent en oses, qui sont ensuite fermentés en AGV.

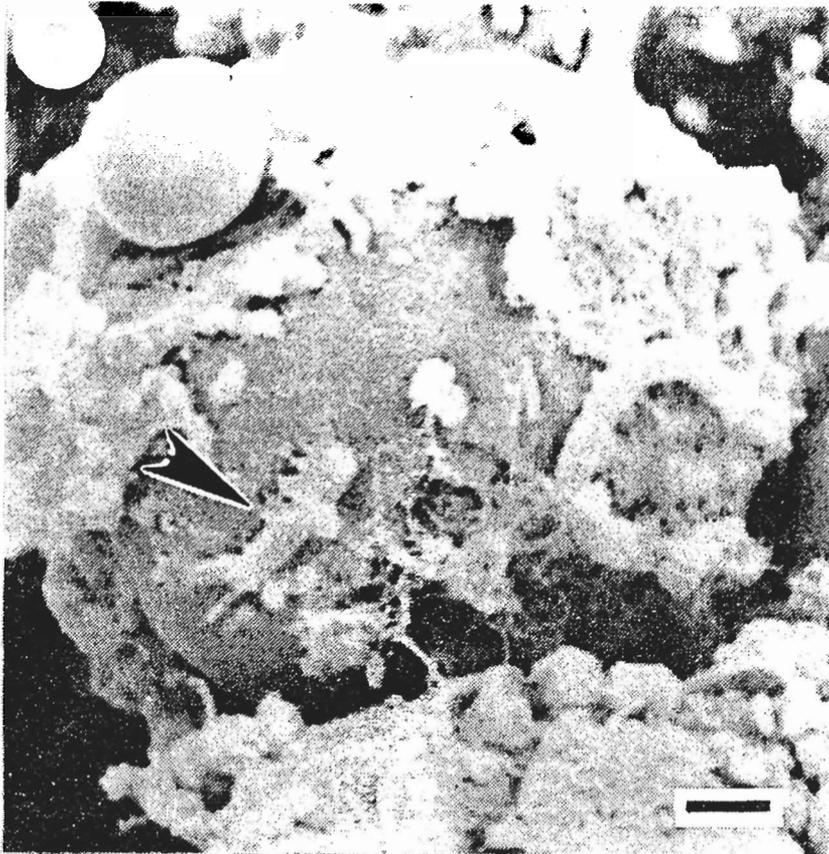
Ces bactéries ont un développement lent et sont sensibles à la diminution du pH.

• Les bactéries amylolytiques:

Elles dégradent tout particulièrement l'amidon. Ces espèces, aussi fixées aux particules alimentaires, prolifèrent préférentiellement à $\text{pH} < 6$. Elles produisent essentiellement de l'acide propionique (C3).

Les principales espèces sont *Prevotella ruminicola*, *Selenomonas ruminantium*, *Streptococcus bovis*, (vitesse de production très rapide),

Succinomonas amylolytica, *Bacteroides amylophilus* (97). Ces bactéries ont une forte vitesse de croissance (d'où des risques d'acidose si le milieu leur est favorable). Elles peuvent stocker un peu de glycogène pour avoir des réserves d'énergie (31).



La flèche montre une bactérie fixée grâce à son glycocalix.

Echelle = 3µm

Figure 2: Bactéries en cours de digestion d'un granule d'amidon (51)

Au niveau des conditions de développement, ces deux populations ont des préférences opposées, et on constate qu'il est difficile d'optimiser les activités cellulolytiques et amylolytiques simultanément.

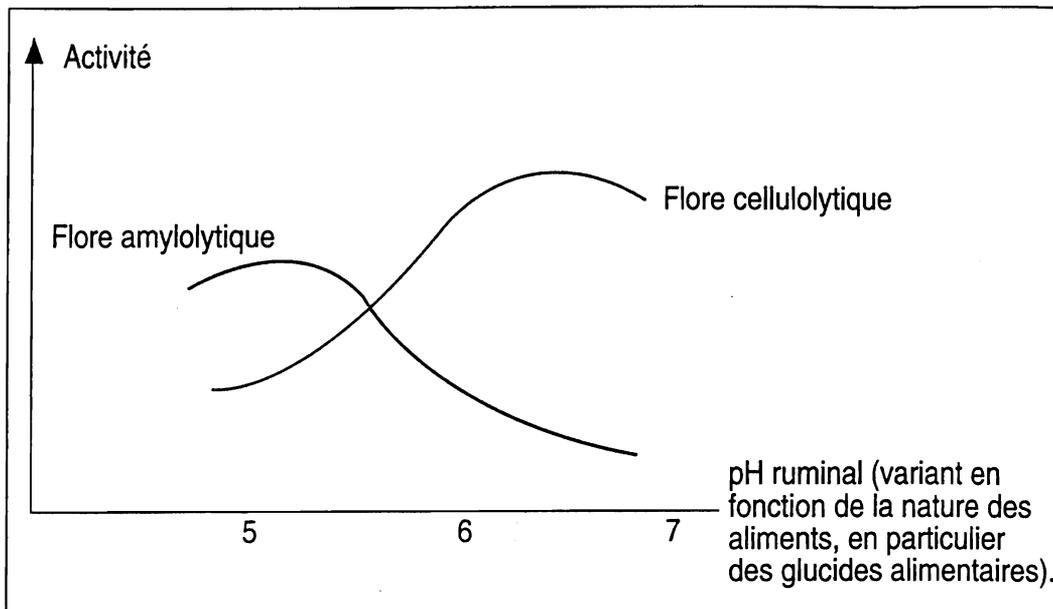


Figure 3: Activité fermentaire en fonction du pH ruminal (64)

Les bactéries protéolytiques

Ce sont essentiellement *Bacteroides ruminicola*, *B. fibrisolvens*, *S. bovis* et *R. amylophilus*. Après s'être fixées sur les particules à digérer avec leur glycocalix elles libèrent des enzymes protéolytiques qui dégradent les protéines en peptides, libérant ensuite des acides aminés, la plupart étant désaminés fournissant l'ammoniaque nécessaire aux synthèses microbiennes (29).

Les bactéries lipolytiques

Encore peu étudiées à ce jour, il est constaté que certaines souches produisent une phospholipase, hydrolysent les triglycérides et peuvent aussi hydrogéner les acides gras insaturés (29).

b- Les bactéries lactiques et lacticoxytiques (29)(64)(93):

Elles se développent à pH acide, métabolisant les substrats en acide lactique principalement. La principale est *Streptococcus bovis*, dont la prolifération est très rapide si les conditions sont favorables (régimes riches en céréales). Leur présence est favorisée par des repas à faible temps de séjour dans le rumen, où elles prennent nettement l'avantage sur les autres populations à prolifération plus lente. Des lactobacilles peuvent également se développer en synergie avec

S. bovis .

Pour limiter la quantité de lactate dans le rumen (et donc réduire la diminution de pH) des bactéries lacticoles (*Megaspharea elsdenii*, *Veillonella alcalescens*, *Selenomonas ruminantium*) métabolisent l'acide lactique en acide butyrique (si $\text{pH} > 5,5$) ou en acide propionique (*M. elsdenii*), si $5 < \text{pH} < 5,5$.

Mais si la production d'acide lactique est très importante et brutale, ces flores sont inactivées et l'acidose lactique apparaît.

c. Les bactéries méthanogènes (18)(29)(64)(93)(97):

Ce sont essentiellement *Methanobacterium ruminantium* et *M. mobile*.

Elles produisent du méthane (CH_4), ce qui permet d'éliminer les ions H^+ en excès, d'où le rôle d'exutoire aux éléments réducteurs H^+ en milieu anaérobie.

En orientant les fermentations vers la production d'acétate (nous verrons ultérieurement comment), elles potentialisent l'activité des bactéries cellulolytiques et la croissance fongique; mais cette production de CH_4 constitue une perte d'énergie pour le ruminant.

Ces bactéries ont une croissance lente favorisée par une ration fibreuse dont le temps de séjour ruminal est long.

d- Les bactéries attachées à la paroi ruminale (29)(64):

Ces espèces permettent d'éliminer l'oxygène diffusant du sang à travers les parois du rumen, maintenant de ce fait l'anaérobiose indispensable à toute la micropopulation ruminale.

Elles sécrètent aussi une uréase qui permet de fournir de l'ammoniaque disponible pour les synthèses microbiennes à partir de l'urée diffusant à travers la paroi ruminale; elles participent aussi au recyclage des protéines des cellules épithéliales desquamées.

Le **tableau 1** (page 11) récapitule le métabolisme des différentes bactéries ruminales.

Substrats	Fermentés	Hydrolysés																										
		Cellulose	Cellodextrines	Cellulobiose	Hémicellulose	Xylodextrines	Pentoses	Amidon	Dextrines	Maltose	Pectines	Ac. Uroniques	Triglycérides	Glycérol	Saccharose	Fructose	Glucose	Galactose	Lactate	Malate	Fumarate	Succinate	Protéines	Peptides	AC. aminés	Hydrogène utilisé	Méthanol	
Espèces																												
<i>Fibrobacter succinogenes</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Ruminococcus albus</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Ruminococcus flavofaciens</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Prevotella ruminicola</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Selenomonas ruminantium</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Streptococcus bovis</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Ruminobacter amylophilus</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Succinomonas amylolytica</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Eubacterium ruminantium</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Succinivibrio dextrinosolvens</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Megasphaera elsdenii</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Lachnospira multiparus</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Anaerovibrio lipolytica</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Veillonella alcalescens</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Methanobacterium ruminantium</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Wolinella succinogenes</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Eubacterium imosum</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tableau 1: Substrats dégradés et fermentés par les principales bactéries du rumen (29)

2. Les protozoaires:

Cette population, qui fût évoquée la première fois en 1843 par Gruby et Delafond (78), compte environ 10^6 individus/ml et représente presque la moitié du total de la biomasse (40%), car la taille des protozoaires est bien supérieure à celle des bactéries (6)(29). Leur étude est difficile car leur culture in vitro est impossible.

Ils apparaissent après les bactéries et les champignons chez le jeune préruminant, en moyenne entre 2 et 3 semaines (29).

Des expériences ont prouvé que leur présence dans le rumen n'est pas indispensable, mais ils améliorent toutefois le rendement des fermentations ruminales (5)(78).

Dans le rumen, on trouve quelques flagellés mais les ciliés sont nettement dominants (5)(78).

Ils sont généralement libres dans le jus de rumen mais certains peuvent se fixer aux particules végétales. Leur mode d'action consiste en l'ingestion de particules puis l'incorporation dans les vacuoles digestives.

Les ciliés se développent surtout chez les animaux nourris avec des rations riches en amidon, des fourrages peu broyés et une distribution en petits repas fréquents; sinon le temps de séjour dans le rumen trop court nuit à leur multiplication.

Bien que non indispensables dans le rumen, les protozoaires permettent un meilleur rendement des fermentations ruminales malgré leur prédation envers les bactéries et les champignons.

La plupart d'entre eux (*Isotrichidae*) métabolisent les glucides solubles et l'amidon, en stockant une partie sous forme d'une molécule proche de l'amylopectine qu'ils digèrent ensuite lentement (18)(73) ce qui permet de tempérer ces fermentations en soustrayant ces substrats à des bactéries amylolytiques et saccharolytiques rapides qui conduiraient à une diminution de pH importante. Par ailleurs, les protozoaires métabolisent l'acide lactique et évitent là aussi une diminution de pH trop forte (97).

Toutefois lors d'un apport massif et brutal de glucides à dégradation rapide, les protozoaires n'ont pas le temps de se développer suffisamment et les bactéries amylolytiques (*S. bovis* et *Lactobacillus*) font baisser rapidement le pH, ce qui conduit à leur destruction (78). Tandis que si l'apport de concentré est progressif,

ils se multiplient et peuvent jouer ce rôle de "tampon".

Certains protozoaires (Ophryoscolacidae) peuvent aussi participer à la cellulolyse (dégradation de la cellulose et de l'hémicellulose)(5)(97). Ils ingèrent les particules fibreuses grâce aux pseudopodes puis ils les digèrent dans leurs vacuoles digestives, et stockent les produits de dégradation dans des vésicules(5)(78).

Ils peuvent aussi ingérer des bactéries entières, bénéficiant ainsi de leurs substrats de fermentation, et permettant d'éviter des proliférations microbiennes anarchiques (31).

Les protozoaires orientent généralement les fermentations vers l'acide acétique (C2), au détriment des acides propionique (C3) et butyrique (C4) (5).

D'autre part, les ciliés sont aussi protéolytiques (5)(6); ils ingèrent les protéines alimentaires et les bactéries, d'où ils extraient les acides aminés qui leur sont nécessaires. Ils resynthétisent ensuite des protéines spécifiques, certaines bien pourvues en lysine et méthionine, donc intéressantes pour l'hôte. Mais la consommation d'acides aminés par les protozoaires est globalement nuisible à l'hôte, car ils diminuent le rendement de la synthèse d'azote microbien (73).

Ils participent aussi à l'hydrogénation (c'est-à-dire la saturation) des acides gras issus de l'hydrolyse des triglycérides par les bactéries (6).

3. Les champignons:

Ce n'est qu'en 1975 que la micropopulation fongique fût mise en évidence dans le rumen par Orpin (28)(89).

Ces champignons, tous anaérobies, sont des formes primitives sans reproduction sexuée. Ils possèdent une forme mobile (zoospores flagellés) et une forme fixée sur les végétaux (sporophytes et rhizoïdes) (28)(89).

Leur quantification est délicate car il est difficile de corréler le nombre de zoospores à un nombre de sporocystes et de rhizoïdes. Toutefois les méthodes récentes, reposant sur un dosage de la chitine (constituant spécifique des parois fongiques) permettent d'estimer la biomasse fongique à environ 8% du total de la

micropopulation ruminale et on peut dénombrer 10^3 à 10^5 zoospores/ml (28).

Ils ne sont pas nécessaires à la survie des ruminants, mais ils jouent un rôle important dans la digestion des fourrages grossiers (28).

Les champignons se développent particulièrement quand les animaux sont nourris avec beaucoup de fibres, même en présence de tissus lignifiés (28) mais ils disparaissent rapidement si le pH descend en-dessous de 5,5 (29).

Toujours fixés aux particules végétales (préférentiellement sur les parties déjà endommagées par la mastication), ils produisent un mycelium dont les rhizoïdes pénètrent dans les tissus et les fragilisent en désorganisant leur structure, y compris les parties lignifiées (dont la dégradation est facilitée par leur séjour plus long dans le rumen). Ces désorganisations facilitent aussi l'accès aux bactéries (32).

Les champignons possèdent un équipement enzymatique complet qui leur permet de dégrader la cellulose, l'hémicellulose et d'hydrolyser les oligosaccharides libérés, produisant principalement de l'acétate (C₂), du formate, du lactate, du CO₂ et de l'H₂, de l'éthanol et pour quelques souches du succinate (28)(89)(97).

La production massive d'hydrogène permet une véritable synergie avec les bactéries méthanogènes (28). En revanche concernant l'activité cellulolytique, les relations sont différentes selon les bactéries cellulolytiques associées.

Certains champignons (*Neocallimastix frontalis*) possèdent aussi une activité protéolytique grâce à des enzymes extracellulaires qui permettent la pénétration des rhizoïdes dans les tissus végétaux. Les protéines ensuite resynthétisées sont riches en lysine, isoleucine, phényl alanine et acides aminés soufrés, donc intéressantes pour l'hôte (28).

Concernant le métabolisme des lipides, à l'heure actuelle peu de résultats ont été publiés. Il semble que des acides gras seraient synthétisés à partir du glucose et de l'acétate, et que les acides gras longs présents seraient incorporés dans des lipides complexes (28).

B- LES DIFFERENTS GLUCIDES DANS L'ALIMENTATION DES RUMINANTS:

Les constituants glucidiques des différentes cellules végétales peuvent être classés en deux catégories:

- Les glucides pariétaux, polymères souvent complexes, d'autant plus nombreux en proportion que la cellule est âgée. Ils sont responsables de la rigidité des végétaux; ils ne sont pas hydrolysables par les enzymes digestives des êtres vivants supérieurs, mais dégradés par la flore cellulolytique (24)(65). Ils se trouvent en grande proportion dans les tiges des fourrages, et les enveloppes des graines.

- Les glucides cytoplasmiques. Ce sont les oses et les autres glucides hydrolysables par les enzymes digestives des êtres vivants supérieurs. Ils se trouvent en grande quantité dans la plupart des aliments dits "concentrés énergétiques" et un peu dans les fourrages jeunes.

Le schéma ci-dessous rappelle la structure générale d'une cellule végétale.

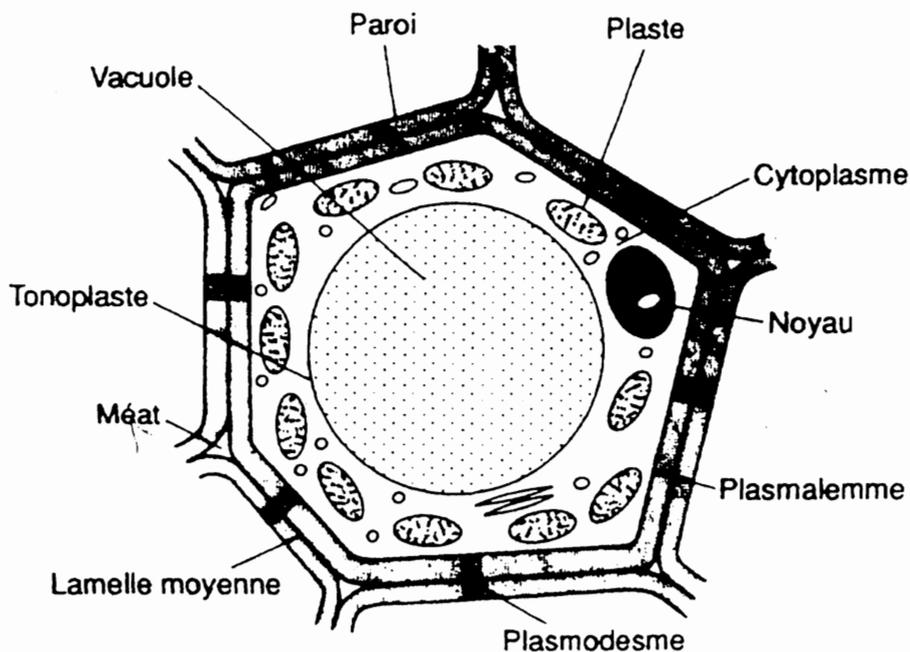


Figure 4: Schéma général d'une cellule végétale (41)

1- Les glucides structuraux (pariétaux):

Ils ne font pas l'objet de notre étude, c'est pourquoi nous nous contenterons de les énumérer brièvement.

a- Les différents types de glucides structuraux (24)(65):

- Les pectines:

Constituées principalement de chaînes d'acides galacturoniques, elles sont facilement dégradées par la microflore ruminale, comme les glucides cytoplasmiques. Leur importance quantitative reste minime dans la plupart des rations.

- Les hémicelluloses:

Ce sont des polymères complexes (hétéropolysaccharides ou hétéropolyholosides) de xylose, glucose, galactose, arabinose et acide glucuronique; elles sont facilement dégradées par les enzymes microbiennes, sauf si elles sont trop liées à la lignine.

- La cellulose vraie:

C'est un polymère (homopolysaccharide) de glucoses en liaison β 1-4, dont l'hydrolyse extracellulaire conduit à des dimères de cellobiose. Elle constitue le principal glucide structural des parois des cellules végétales.

- La lignine:

Sa structure est non glucidique, mais elle est classiquement rangée parmi les glucides pariétaux, car liée aux hémicelluloses et celluloses. C'est un polymère complexe de composés aromatiques phénoliques, très difficile à dégrader. Sa proportion augmente fortement avec l'âge de la cellule végétale.

Les proportions de ces différents constituants pariétaux varient en fonction de l'âge des cellules. Les cellules jeunes ont des parois assez fines avec un cytoplasme important et contiennent des hémicelluloses et des pectines. Les cellules plus anciennes sont plus rigides; leurs parois s'épaississent, diminuant ainsi les échanges avec l'extérieur. Elles sont alors constituées de cellulose avec plus ou moins de lignine dans les angles. Quant aux vieilles cellules, leurs parois sont encore plus épaisses avec une rigidité encore accrue, et leurs composants sont majoritairement de la lignine, avec un peu d'hémicellulose et de la pectine. Des variations reposent aussi sur les spécialisations de ces cellules: les tissus de

soutien, de revêtement, sont constitués de cellules à paroi épaisse.

b- détermination de la teneur des aliments en composés pariétaux:

- La méthode de Weende consiste à réaliser une double hydrolyse, acide (H_2SO_4) à ébullition pendant 30 minutes puis alcaline (NaOH) à ébullition également pendant 30 minutes, puis à laver, sécher, peser, puis incinérer et repeser. La différence de masse entre les deux pesées est assimilée aux constituants pariétaux et est nommée CB: Cellulose Brute ou de Weende .

Cette méthode est très facile à mettre en oeuvre mais sous-estime la quantité des constituants pariétaux car une partie est détruite (notamment des hémicelluloses et de la lignine) (24).

- La méthode de Van Soest consiste en des extractions successives par détergents :

1. A partir d'un échantillon sec, on utilise une solution détergente neutre ou NDS pour séparer les pectines et les glucides cytoplasmiques du résidu appelé NDF (Neutral Detergent Fiber) comprenant la lignine, la cellulose, les hémicelluloses et un résidu de composition hétérogène "R".
2. Ce NDF est ensuite soumis à l'action d'une solution détergente acide (ADS) séparant ainsi les hémicelluloses du résidu ADF contenant la lignine, la cellulose, et le résidu "R".
3. Ensuite, cet ADF est soumis à l'action d'une solution détergente acide (H_2SO_4) ce qui élimine la cellulose. Il reste alors un résidu ADL, comprenant la lignine et le résidu "R".
4. Une oxydation par le permanganate de potassium ($KMnO_4$) permet de séparer la lignine du résidu "R".
5. Une incinération sépare enfin la matière organique (cutine, subérine) des minéraux insolubles.

Cette méthode, plus longue et plus onéreuse que la méthode de Weende, présente l'avantage d'être plus précise et de séparer chaque constituant de la paroi.

Ainsi le NDF correspond assez précisément à tous les constituants pariétaux sauf les pectines; le ADF à la lignine et la cellulose et le ADL à la lignine. Les

hémicelluloses sont représentées par NDF-ADF et la cellulose vraie par ADF-ADL (24).

2- les glucides cytoplasmiques:

On peut en distinguer deux groupes: les sucres solubles et l'amidon.

a. les sucres solubles:

Ce sont les oses et les diholosides ou disaccharides. Ils sont très rapidement fermentés. Ils représentent généralement moins de 10% des rations, et sont présents dans les feuilles et les tiges jeunes, et plus nombreux dans les racines de betterave, les pulpes d'agrumes (20 à 25% de la MS), la mélasse (plus de 50% de la MS), les tubercules ou le lactoserum (13)(20)(24)(65)(89).

b- L'amidon:

Structure chimique (13)(82)

Constitué essentiellement d'une fraction glucidique (à 99%), c'est un polyholoside composé de deux types de macromolécules reliées entre elles par des liaisons hydrogène:

- L'amylose, polymère principalement linéaire de D-glucoses en liaisons α 1-4, avec quelques liaisons α 1-6. En moyenne, l'amylose représente de 20 à 30% du poids total, mais les amidons de certaines variétés de grains (cireuses) n'en possèdent presque pas.

- L'amylopectine, ramifiée, composée de D-glucoses en liaisons α 1-4 et α 1-6 au niveau des ramifications. Elle est plus grosse que l'amylose et représente en moyenne 70 à 80% du poids de l'amidon.

L'amidon se présente sous forme de granules avec un hile autour duquel on observe des zones concentriques alternativement claires et sombres. En général les granules sont volumineux et lenticulaires (type A, présents surtout dans les amidons de céréales) ou petits et sphériques (type B, plutôt caractéristiques des amidons de tubercules, mais présents aussi dans les céréales); quant aux amidons

de légumineuses, ils présentent une structure "C" intermédiaire.

Propriété physique particulière

En présence d'eau en excès, et avec une température croissante, les granules d'amidon subissent un gonflement; puis lorsque la température dépasse 60°C c'est la gélatinisation, au cours de laquelle ces granules perdent leur structure, formant un empois correspondant à un ensemble de grains "fantômes" (13).

Nous verrons ultérieurement l'importance pratique de cette propriété.

Sources d'amidon

La principale source d'amidon dans l'alimentation des ruminants est représentée par les grains, et tout particulièrement les céréales. Dans les grains de céréales, qui sont des caryopses, l'amidon se localise essentiellement dans l'albumen ou endosperme:

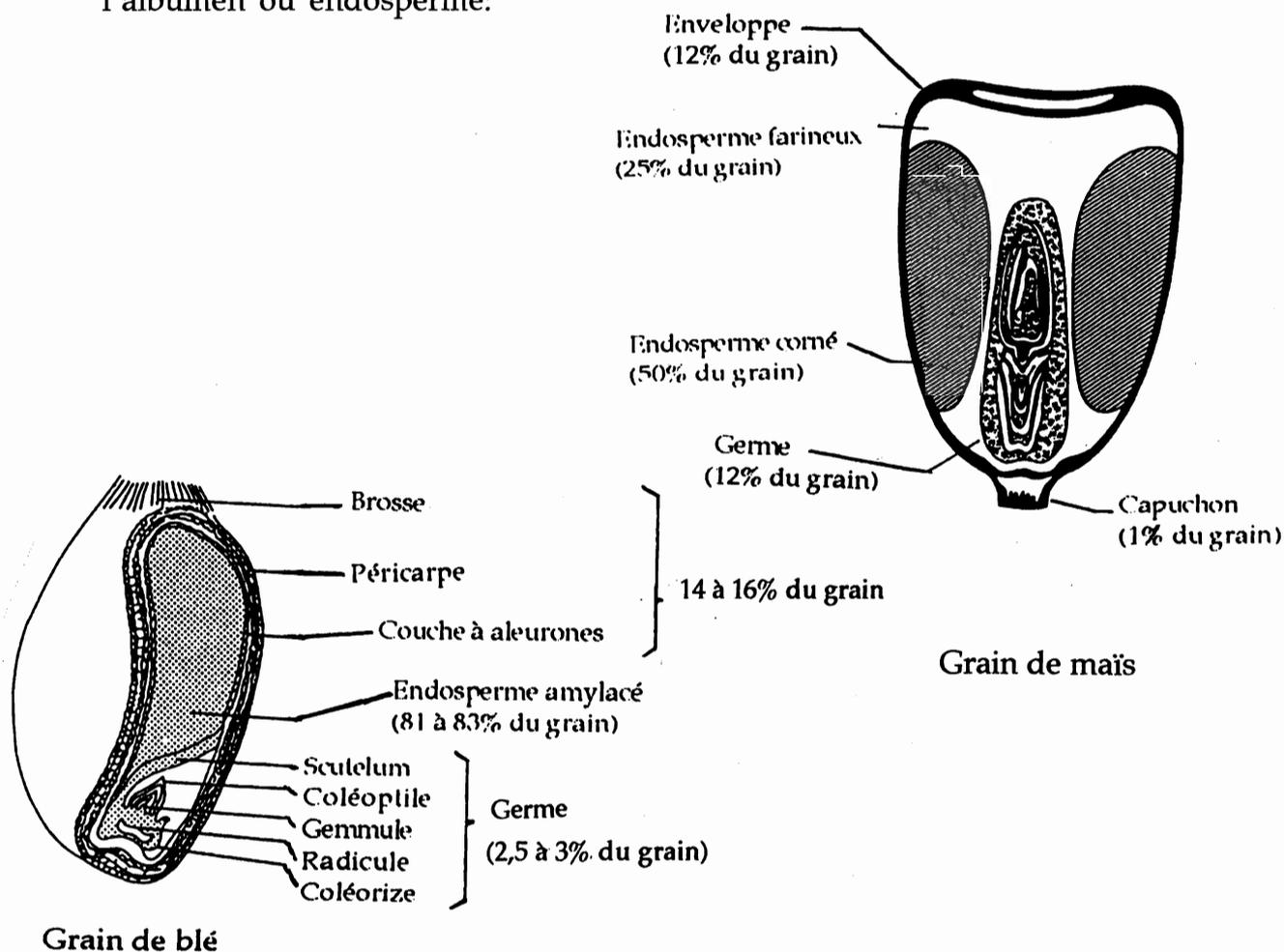


Figure 5: Coupe schématique des grains de maïs et de blé (84)

Nous voyons que l'amidon se situe en partie interne des grains; nous verrons ultérieurement les conséquences de cette localisation et de la structure de l'endosperme sur sa digestion.

Parmi les céréales couramment utilisées dans l'alimentation des ruminants, c'est le blé qui contient le plus d'amidon avec 77% de la MS en moyenne, suivi par le maïs et le sorgho (environ 72%), l'orge et l'avoine (57-58%) (40)(65). Mais ces teneurs moyennes peuvent changer en fonction des variétés, des facteurs météorologiques, et du stade de récolte; en effet, l'amidon étant une molécule de réserve, sa teneur augmente avec la maturité du grain.

Les pommes de terre peuvent éventuellement être utilisées comme source d'amidon, qui représente environ 60-65% de leur matière sèche (45)(90), de même que le pois, qui contient environ 50% d'amidon sur la matière sèche (90).

c- Détermination de la teneur en glucides cytoplasmiques (20)(24):

D'après la méthode de Weende, les glucides cytoplasmiques correspondent à l'Extractif Non Azoté (ENA), avec:

ENA = MS - CB - cendres - Matières Azotées Totales (MAT) - Matière grasse (MG).

Mais, la valeur CB sous-estimant les constituants pariétaux (hémicellulose et lignine), l'ENA sur-estime les glucides cytoplasmiques.

D'après la méthode de Van Soest, les glucides cytoplasmiques correspondent à: MS - NDF - cendres - MAT - MG.

Cette méthode est plus précise mais elle inclut les composés pectiques (qui sont des glucides pariétaux mais se comportent comme des composés cytoplasmiques sur le plan de la digestion).

On peut aussi procéder par dosages polarimétriques ou enzymatiques pour l'amidon.

Nous pouvons alors résumer cette classification des glucides végétaux par la **figure 6** de la page suivante:

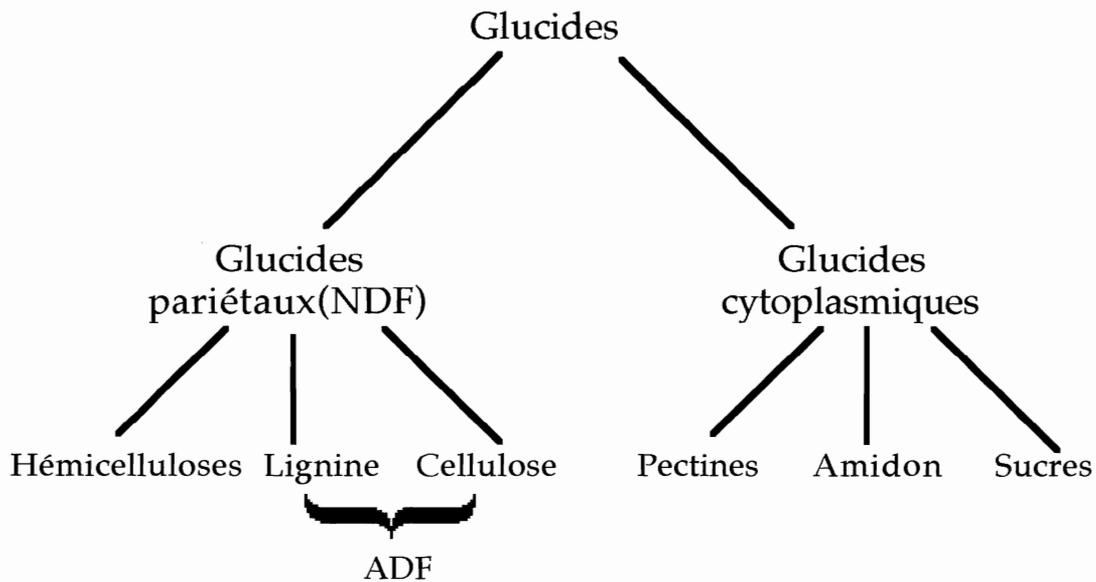


Figure 6: Les différents glucides végétaux (65)

C- VOIES BIOCHIMIQUES DE LA DEGRADATION DES GLUCIDES

Nous nous intéresserons à la dégradation intraruminale, sachant que, chez les ruminants, la majeure partie des glucides est dégradée dans les pré-estomacs (75 à 100% de la dégradation des glucides pariétaux et 50 à 100% de la dégradation des glucides cytoplasmiques ont lieu dans ces préestomacs)(44). Une partie de l'amidon échappant à la dégradation intraruminale sera digéré par l'amylase pancréatique dans l'intestin grêle ou fermenté dans le gros intestin.

Bien que seuls les glucides cytoplasmiques nous intéressent ici, nous signalerons malgré tout, pour comprendre ultérieurement les influences qu'elles peuvent avoir sur le reste, les voies de dégradation des glucides pariétaux.

1- Principes généraux de la dégradation ruminale des glucides:

Environ les deux tiers des glucides pariétaux sont dégradés alors que la totalité des sucres simples est digérée; l'amidon est dégradé dans des proportions très variables selon son origine (24). Cette dégradation, qui est le fruit exclusif de la micropopulation ruminale, se divise en deux phases:

a) Phase d'hydrolyse:

On la dit extrabactérienne parce que la majorité des microorganismes effectuent ces hydrolyses grâce à des enzymes extracellulaires, mais certains protozoaires agissent en ingérant les particules alimentaires qui se retrouvent dans des vésicules digestives, et sont digérées par des enzymes endocellulaires (42).

Cette phase concerne aussi bien les glucides pariétaux que les glucides cytoplasmiques de réserve (amidon).

La flore cellulolytique (à action lente), qui domine quand le pH est supérieur à 6, dégrade :

- . les hémicelluloses pour fournir des xylobioses puis des pentoses (le xylose étant dominant), puis des trioses et du fructose.
- . la cellulose pour fournir des cellobioses puis du glucose et du glucose-1-phosphate.
- . les pectines pour fournir des acides pectiques puis de l'acide galacturonique puis du xylose (42)(64)(97).

La flore amylolytique, dominante quand le pH est inférieur à 6, dégrade les amidons en maltose puis en glucose et glucose-1-phosphate (24)(42)(97).

Remarque: Les composés ligniques restent généralement inattaqués par la micropopulation ruminale.

b) Phase de fermentation intracellulaire:

Les sucres solubles et les oses libérés par les hydrolyses pénètrent, par transport actif, dans le cytoplasme des microorganismes pour y subir des cascades de réactions chimiques. Les hexoses (par la voie de la glycolyse) et les pentoses (par la

voie des pentoses) fournissent de l'acide pyruvique, véritable plaque tournante des fermentations des glucides (42)(64)(97).

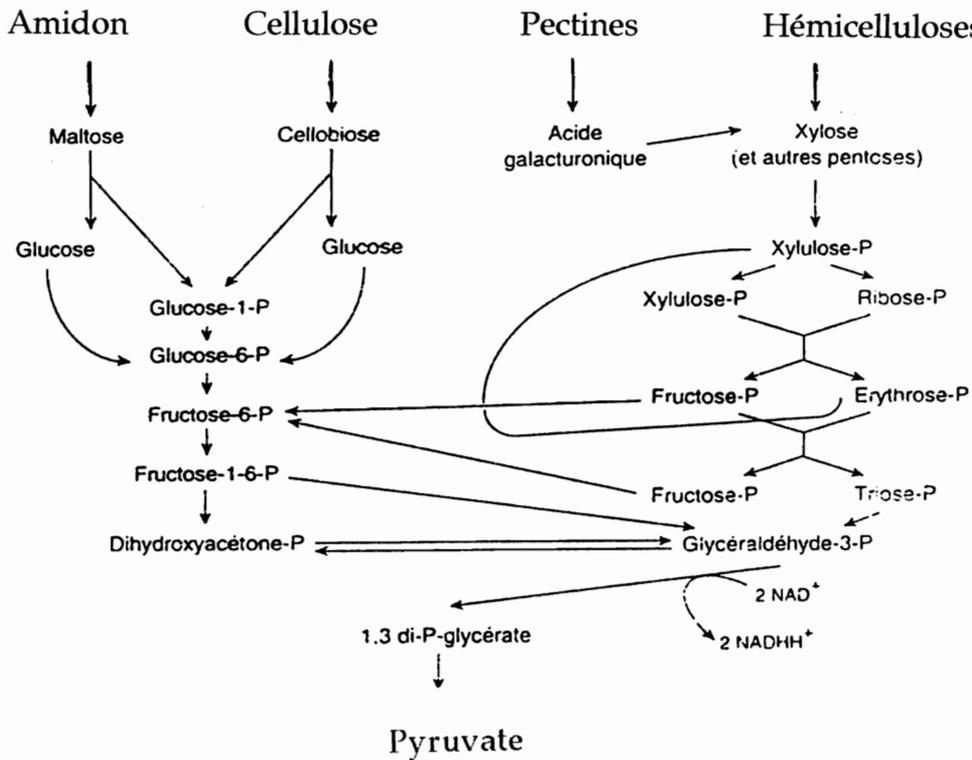


Figure 7 : Premières étapes de la dégradation des glucides dans le rumen (42)

Ces réactions peuvent se résumer par l'équation stoechiométrique suivante (97):



Puis l'acide pyruvique peut suivre différentes voies métaboliques, selon les conditions du milieu.

2- Cascades de réactions biochimiques et production d'acides gras volatils:

Trois principaux acides gras volatils peuvent être formés, représentant environ 95% des acides gras produits, les 5% restant sont des acides gras divers, dans des proportions variables mais toujours minimales (97).

REMARQUE: Les pourcentages donnés sont des pourcentages molaires.

a) Production d'acide acétique C2:

Quantitativement, l'acide acétique est le plus important des acides gras volatils: il représente en moyenne 60 à 65% des acides gras volatils produits avec des rations classiques (24)(42)(44).

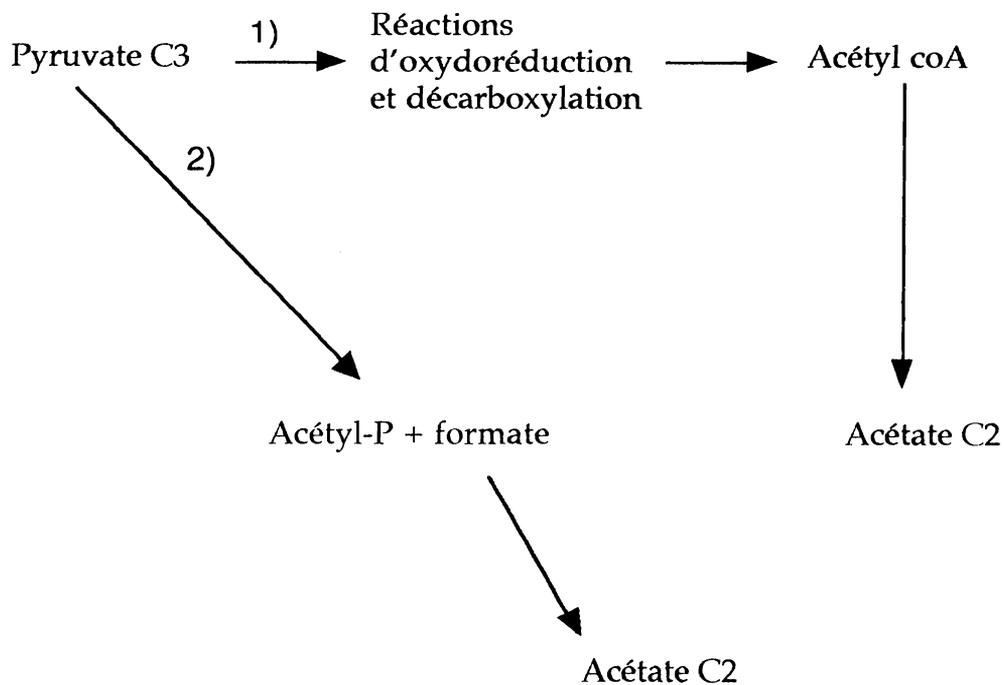


Figure 8: Production d'acide acétique (42)(97)

Cette production peut se résumer par l'équation suivante (97):



b) Production d'acide propionique C3:

L'acide propionique représente en moyenne 20 à 25% des acides gras volatils produits avec des rations classiques (42)(64)(97). Deux voies principales sont connues:

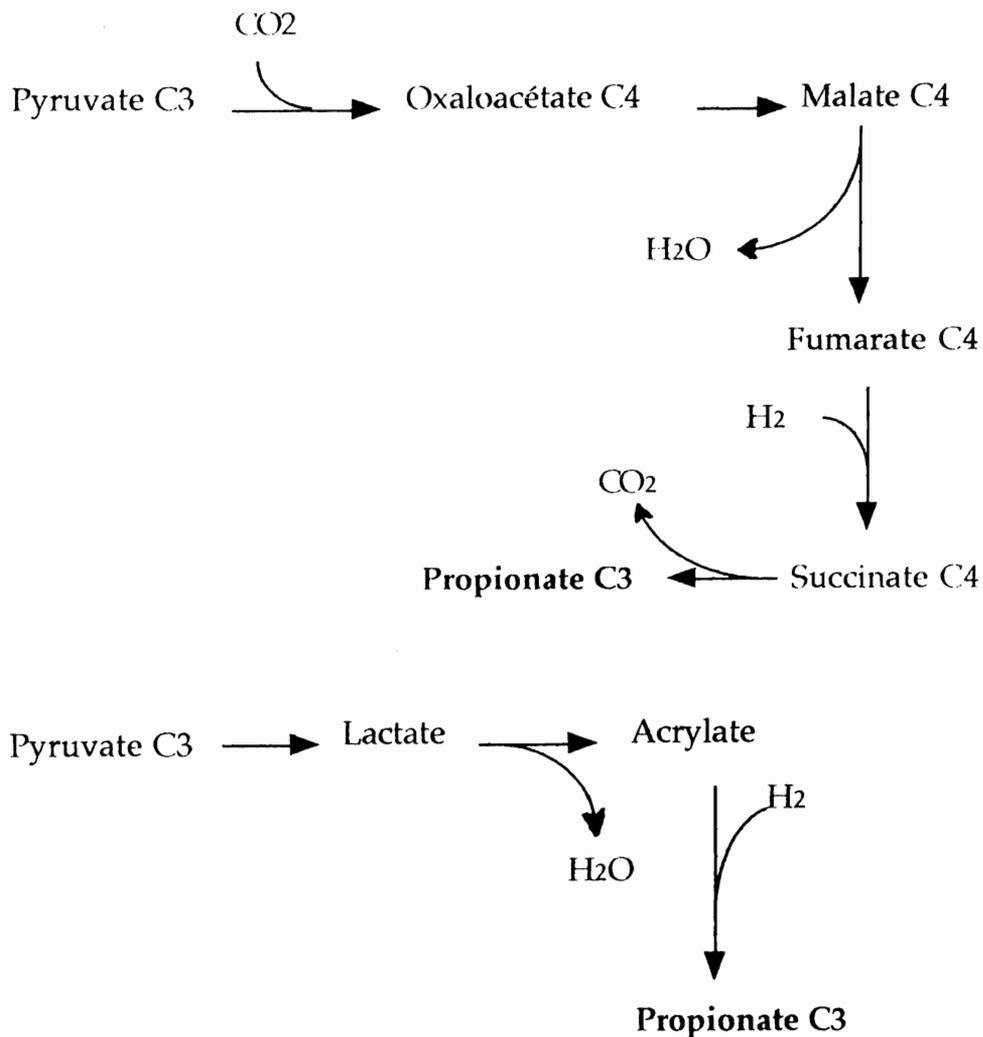
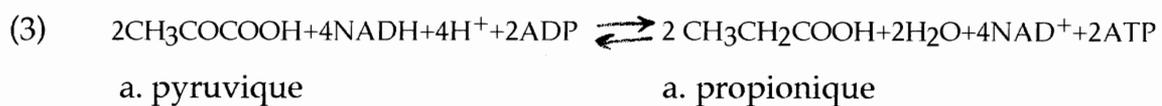


Figure 9: Voies de production de l'acide propionique (42)(97)

La production d'acide propionique peut se résumer comme suit (97):



c) Production d'acide butyrique C4:

L'acide butyrique représente en moyenne 10 à 15% des acides gras volatils produits (24)(42)(44). Deux voies principales ont été décrites:

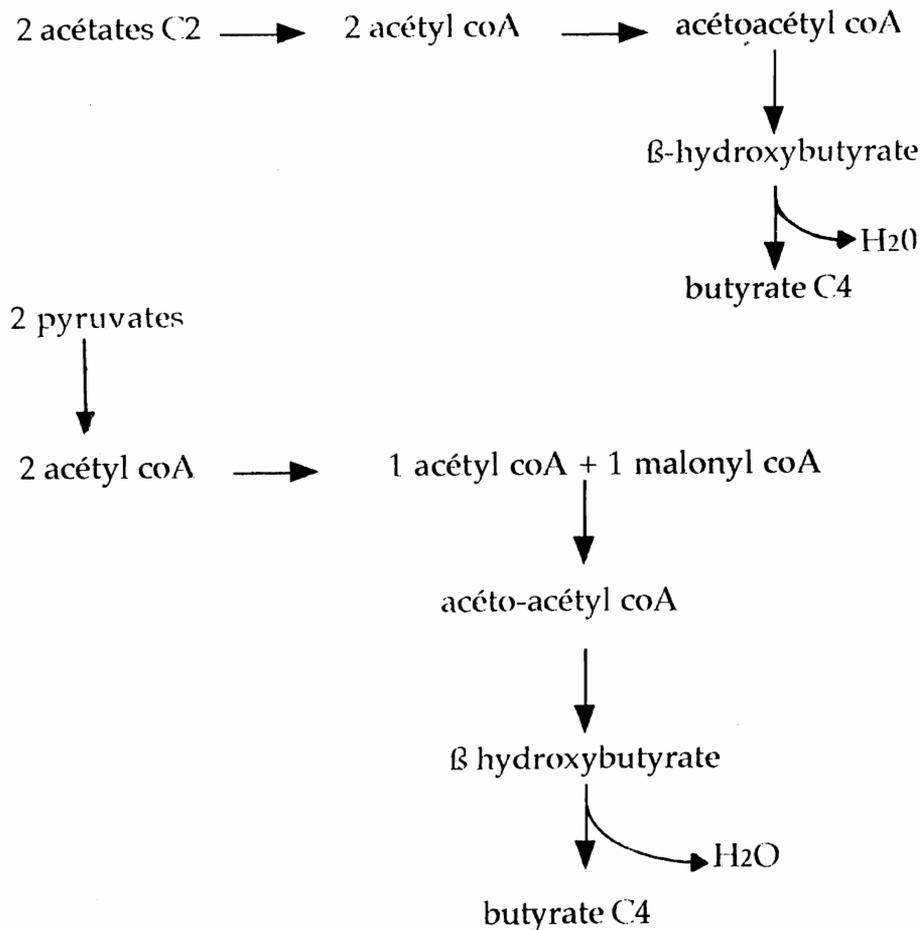
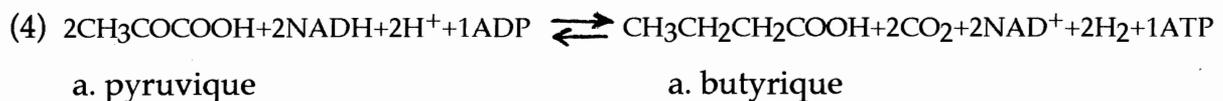


Figure 10: Production d'acide butyrique (42)(64)(97)

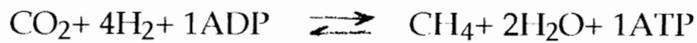
On peut la résumer comme suit à partir de l'acide pyruvique:



d) Production de méthane:

Parallèlement à ces réactions les bactéries méthanogènes (*M. ruminantium* et *M. mobile*) produisent du méthane à partir de CO₂, H₂ et d'acide formique; donc sa production est essentiellement couplée avec les productions de C₂ et C₄ (décarboxylations).

La synthèse de méthane peut se résumer par l'équation suivante (97):



Elle constitue une perte d'énergie pour l'hôte, mais parallèlement cette synthèse joue un rôle primordial dans l'orientation des fermentations.

Les voies biochimiques de dégradation des glucides peuvent alors se résumer comme suit:

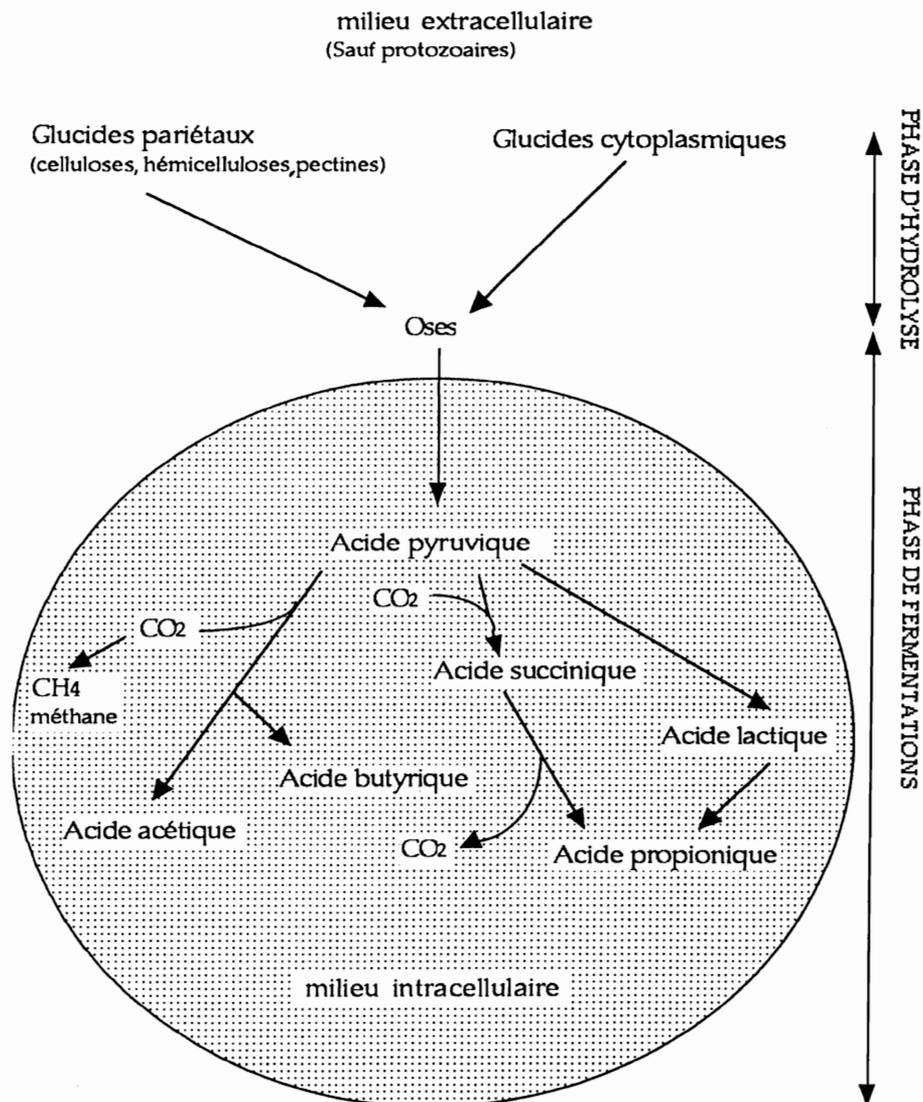


Figure 11: Résumé des voies biochimiques de la dégradation des glucides dans le rumen (24)

De même, le bilan global de toutes ces réactions de fermentation des glucides peut se résumer par l'équation stœchiométrique ci-dessous, avec les proportions molaires moyennes suivantes: 65% de C2, 25% de C3, et 10% de C4 (42)(44):

$50 \text{ C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 59 \text{ acétates C}_2 + 23 \text{ propionates C}_3 + 9 \text{ butyrates C}_4 + 24 \text{ CH}_4 + 53 \text{ CO}_2 + 230 \text{ ATP}$
(Soit 8kg de [C,H,O] → 3,5kg C2 + 1,7kg C3 + 0,8kg C4 + 535 l de CH4 + 1187 l de CO2).

Les coefficients de ces équations stœchiométriques sont indicatifs, mais ne sont pas tout à fait justes, car une petite partie des glucides sont fermentés par d'autres voie métaboliques, sans passer par les hexoses (97).

Par ailleurs, les proportions moyennes indiquées sont susceptibles de varier en fonction de nombreux facteurs.

3- Facteurs influençant la production d'acides gras volatils et de gaz.

a- Nature de la ration:

#Teneur en cellulose brute (CB):

Diverses expériences ont montré la corrélation positive entre la teneur en cellulose brute de la ration et la proportion de C2 dans le mélange d'AGV obtenus, qui peut atteindre 70%.

Ainsi on constate qu'avec des fourrages grossiers ou des plantes plus âgées, la production de C2 est favorisée.

Cela peut s'expliquer grâce aux équations stœchiométriques (97):

Ration fibreuse ----> Fermentations lentes avec augmentation du temps de séjour et activité fermentaire faible
 ----> Faible consommation de NAD⁺ (jusqu'à la formation du pyruvate)
 ----> Faible quantité de NADH,H⁺ libérée
 ----> Equations (3) et (4) peu favorisées
 ----> Equation (2) dominante
 ----> Augmentation de C2 en proportion.

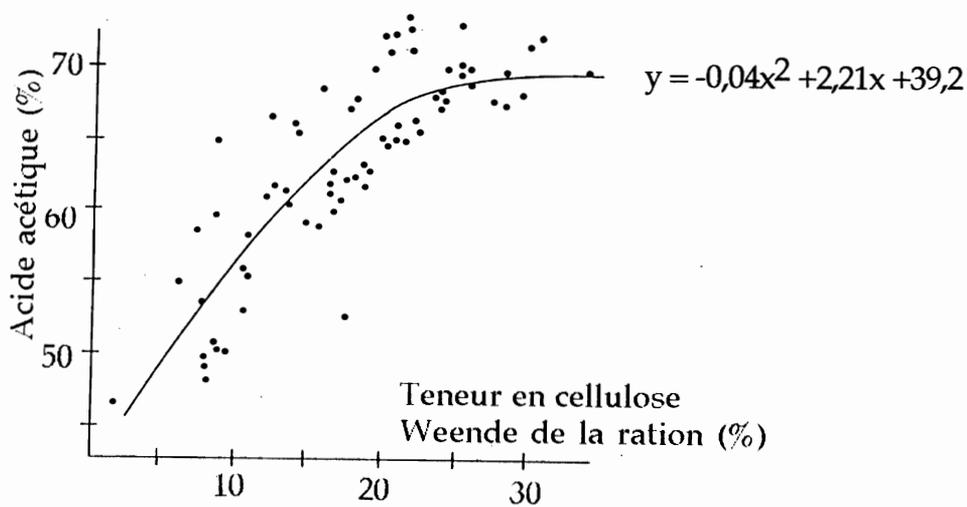


Figure 12 : Liaison entre la teneur en CB de la ration et la proportion d'acide acétique dans le rumen (Vérité et Journet, 1975, in (64))

#Présence de concentrés riches en amidon:

Leur présence en quantité importante dans la ration favorisera en revanche la production d'acide propionique (C3) qui peut atteindre 30%, au détriment de l'acide acétique (C2) (80)(89).

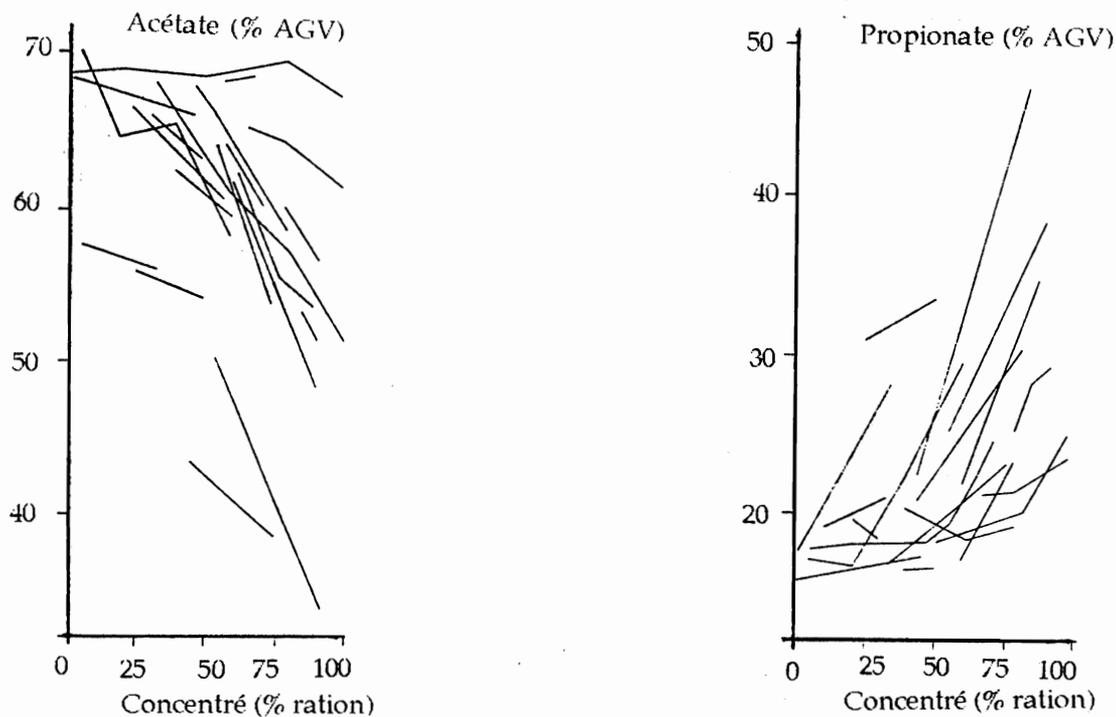


Figure 13 : Influence du niveau d'incorporation d'aliments concentrés sur les fermentations acétique et propionique dans le rumen (89)

De même, cette augmentation de C3 aux dépens de C2 peut s'expliquer grâce aux équations stœchiométriques:

Présence de Glucides à dégradation rapide, ou présence de concentrés en grande quantité ----> Taux de renouvellement plus rapide et ingestion augmentée.

----> Equation (1) favorisée car beaucoup de substrats à fermenter

----> NADH,H⁺ augmente et NAD⁺ est consommé

----> Equation (3) favorisée (car NADH nécessaire) et équation (2) défavorisée

----> Production d'acide propionique augmentée

#La présence de glucides solubles (saccharose, inuline, lactose) favorise la production d'acide butyrique C4 et augmente légèrement les proportions d'acide propionique (24)(42)(44).

Par exemple, les betteraves ajoutées à la ration induisent une proportion accrue d'acide butyrique (jusqu'à 20 à 25%), aux dépens de l'acide acétique, mais l'acide propionique augmente peu et le pH reste suffisamment élevé, préservant ainsi les protozoaires qui séquestrent une partie des glucides fermentescibles et les soustraient aux bactéries à fermentations rapides.

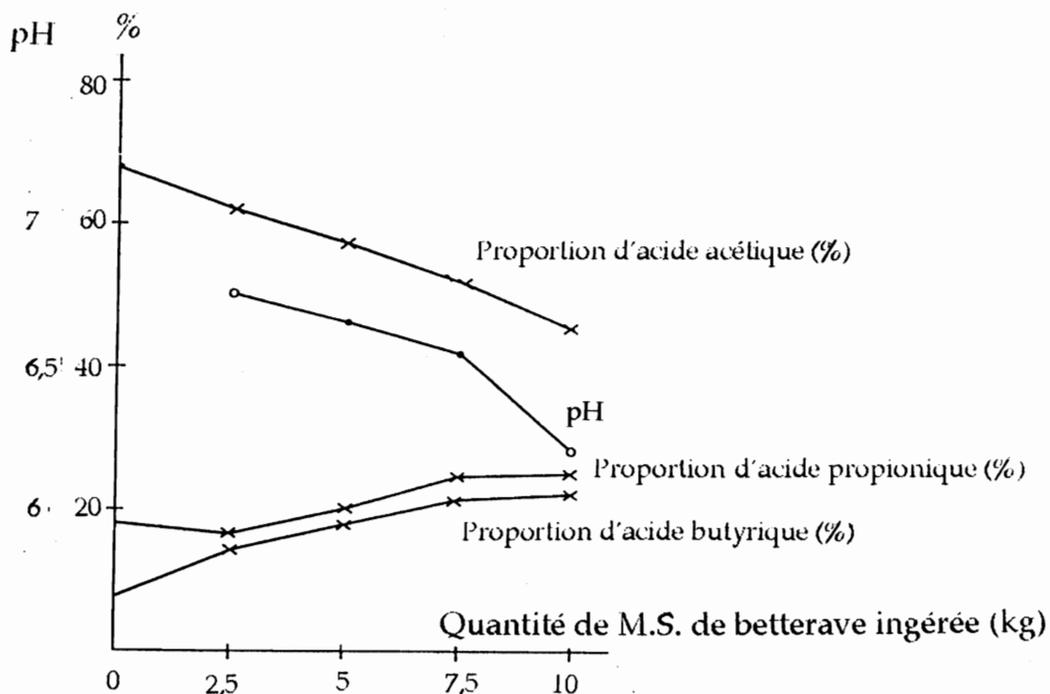


Figure 14: Influence de la teneur en sucres solubles sur les fermentations ruminales de la vache laitière (valeurs obtenues 3h après le repas)(d'après Vérité et Journet, 1973, in (64))

L'explication de ces influences peut aussi se trouver dans les équations stœchiométriques (même principe que pour C3) puisque la production de C4 nécessite aussi des NADH, H⁺.

En résumé, les amidons et les glucides solubles favorisent la production de C3 et/ou C4 aux dépens de C2, puisque leur dégradation est plus rapide que celle des glucides pariétaux, ce qui est renforcé par une diminution du pH ruminal qui n'est pas favorable à la flore cellulolytique productrice de C2 (44).

#La digestibilité globale de la ration influence aussi la production d'AGV, en augmentant les proportions de C3 et C4 aux dépens de C2, qu'elle soit composée uniquement de fourrages ou de fourrages et de concentrés. Mais les écarts se creusent si la proportion de concentrés augmente (44).

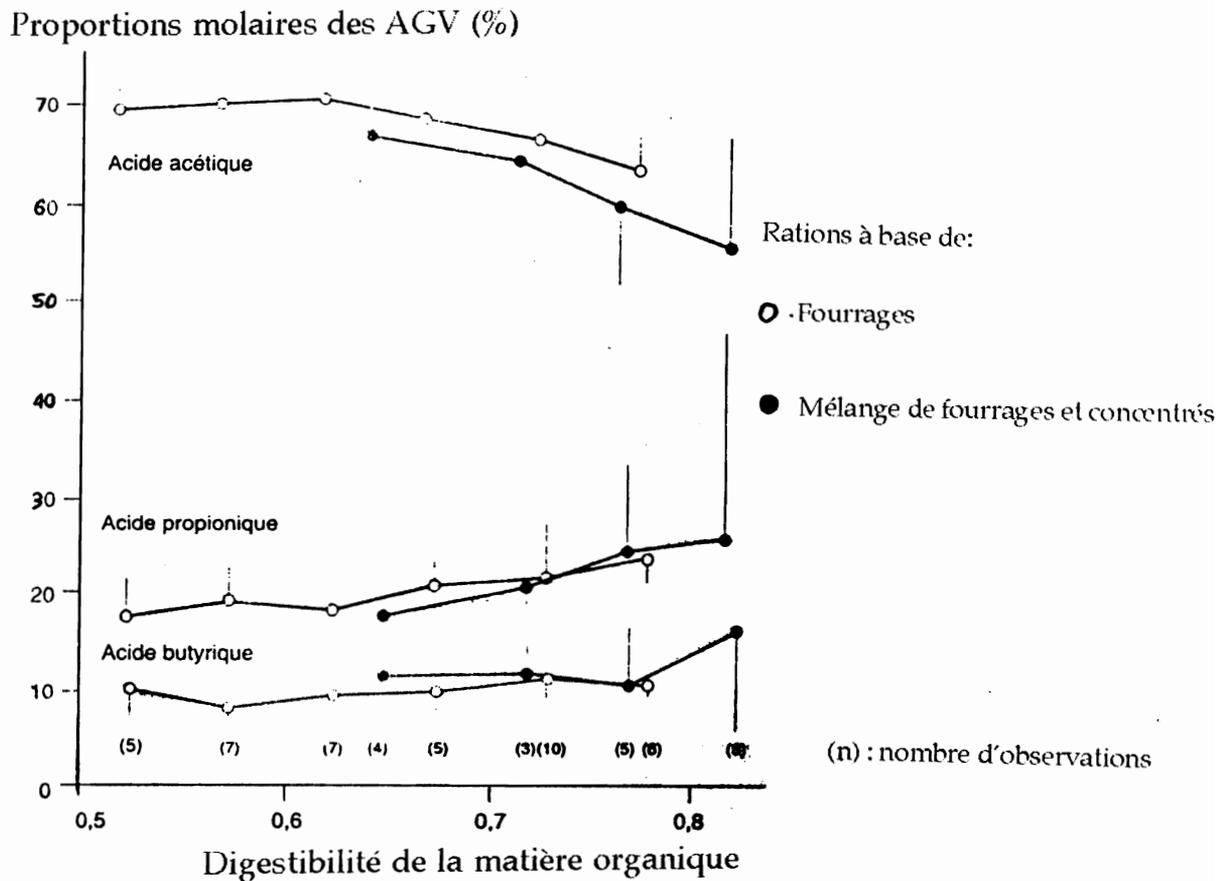


Figure 15: Influence de la digestibilité globale de la ration sur les proportions d'AGV dans le rumen (d'après Thomas et Rook, 1981, in (44))

b- Niveau d'ingestion:

Il modifie principalement le temps de séjour des aliments dans le rumen. Ainsi, avec une augmentation du niveau d'ingestion, on observe une diminution en proportion de la digestibilité des aliments les plus lentement digérés, à cause de la diminution du temps de séjour.

Donc globalement la quantité d'AGV augmente, mais leurs proportions ne sont affectées que si l'on a une forte proportion de concentrés: la production de C3 augmente alors nettement par rapport à C2 (44)(80).

c- Présentation des aliments:

Le broyage joue aussi un rôle dans la production des AGV, puisque la diminution de la taille des particules induit un temps de séjour et de rumination plus faibles d'où une activité cellulolytique diminuée et une diminution de C2 avec une augmentation de C3 et/ou C4, phénomène d'autant plus important que la proportion de concentré augmente, sauf si l'on maintient une certaine quantité de fourrage grossier dans la ration (44).

	Forme de présentation (1)	Taille moyenne des particules	% des particules >1,25mm	% molaire				
				C2	C3	C4	iC4	C5+iC5
Ray-grass	condensée	0,49 mm	2	57,0	24,4	16,5		2,1
	compacté	0,77 mm	17	58,2	21,7	18,4		1,7
Luzerne	condensée	0,82 mm	21	67,8	20,5	10,0		2,6
	compactée	1,12 mm	34	67,8	21,0	8,6		2,6
	comprimée	1,25 mm	48	70,4	20,5	7,5		1,6

(1) Condensée: broyage + agglomération.

Compactée: agglomération sous forte pression sans broyage.

Comprimée: agglomération sous faible pression sans broyage.

Tableau 2: Influence de la forme de présentation des aliments sur la composition du mélange d'AGV dans le rumen (44)

d- Le pH:

Il est en fait tributaire des autres facteurs de variation et il joue un rôle important dans la sélection des différentes populations ruminales.

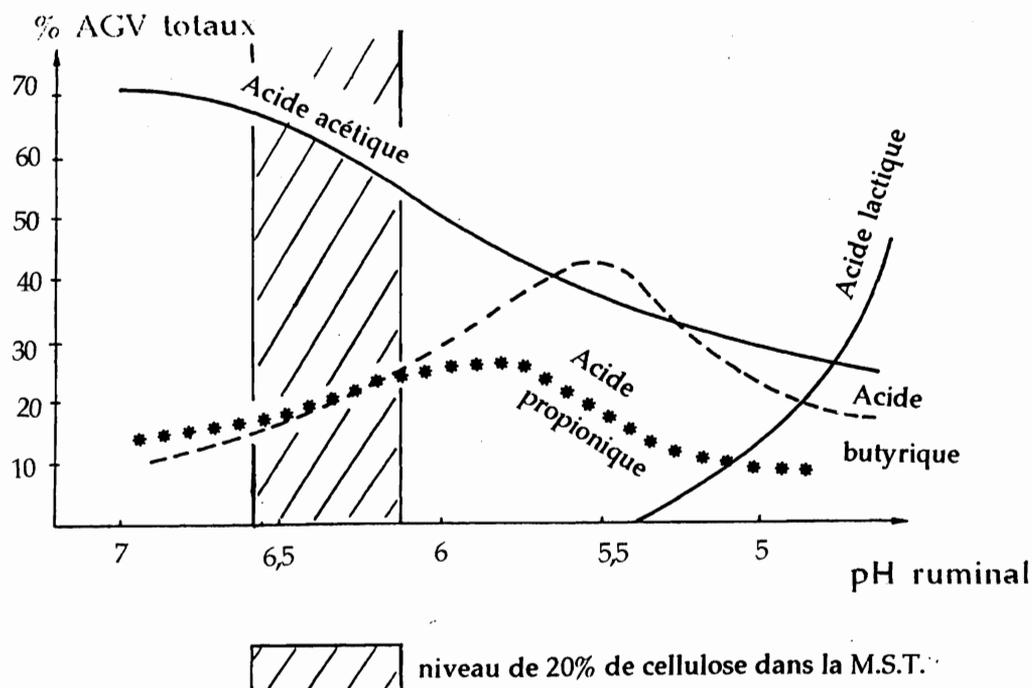


Figure 16: Influence du pH ruminal sur le profil des AGV (pourcentages molaires)(4)

Avec un régime essentiellement fourrager, le pH reste à peu près constant toute la journée, grâce à la salive produite pendant la mastication, et la flore cellulolytique reste prédominante, d'où la nette dominance des C2 (60).

Avec des rations riches en céréales, les bactéries amylolytiques à développement rapide libèrent de grandes quantités d'acide propionique provoquant une diminution de pH défavorable à la flore cellulolytique, d'où la diminution de C2 associée à l'augmentation de C3, avec même apparition d'acide lactique si le phénomène s'amplifie (60).

II- ETUDE CINETIQUE

A- DONNEES EXPERIMENTALES ET MODELES MATHEMATIQUES

1-Méthodes d'étude

a) Technique "in sacco":

Cette méthode consiste à mettre en incubation dans des sachets le ou les substrats à étudier et à mesurer l'évolution des quantités de matière sèche qui restent dans les sachets en fonction du temps (60), ces sachets étant soit placés dans le rumen (méthode "in situ"), soit dans un inoculum ruminal prélevé (méthode "in vitro"); cette dernière méthode étant plus facile à mettre en oeuvre mais sans doute moins représentative de la réalité du fait de l'absence des protozoaires dans ces conditions.

Ces techniques sont très utilisées actuellement du fait de leur relative facilité de mise en oeuvre et parce qu'elles permettent d'obtenir assez facilement des cinétiques de dégradation des constituants, et constituent, à ce titre, la méthode de référence pour les études de cinétique de dégradation des aliments (90).

Toutefois cette méthode présente quelques limites qui méritent d'être mentionnées et qui doivent être prises en considération: elle ne tient pas compte de la présentation et de la granulométrie des aliments puisque l'échantillon est toujours broyé avant incubation. Et, elle ne tient pas compte non plus de la nature et des proportions des différents constituants et de leurs interactions avec l'activité microbienne, puisque dans les sachets l'écosystème est à part. Enfin, certains substrats solubles fuient à travers les pores des sachets et peuvent fausser les résultats puisque la disparition est assimilée à une dégradation (60).

b) Technique "in vivo":

Cette méthode ne permet pas d'établir la cinétique, mais seulement la dégradabilité qui est en fait en relation étroite avec la cinétique. Elle consiste à mesurer et à analyser les flux de digesta qui quittent le rumen par la mise en place d'une canule au niveau duodénal ou abomasal, avec des prélèvements à

intervalles de temps réguliers (60)(89).

2- Résultats et modèles mathématiques

a) Modèle de base:

Pour les amidons, on considère que la vitesse de dégradation dDt/dt à un instant t donné est proportionnelle à la fraction potentiellement dégradée non encore dégradée à ce même instant t . L'équation différentielle correspondant à la vitesse de dégradation des amidons est alors la suivante (85) (87):

(1) $dDt/dt = c (Dp - Dt)$, où Dp est la fraction potentiellement dégradée, Dt la fraction dégradée à l'instant t , et c est le taux de dégradation horaire en h^{-1} .

On obtient, après intégration,

$$(1) \Leftrightarrow \int dDt / (Dt - Dp) = \int -c dt$$

$$\Leftrightarrow [\ln (Dt - Dp)]_{t_0}^t = [-ct]_{t_0}^t$$

$$\Leftrightarrow \ln [(Dt - Dp) / (Dt_0 - Dp)] = -c(t - t_0)$$

$$\Leftrightarrow (Dt - Dp) / (Dt_0 - Dp) = e^{-c(t - t_0)}$$

$$\Leftrightarrow Dt = Dp + (Dt_0 - Dp) e^{-c(t - t_0)}$$

Ainsi, l'équation est la suivante:

$$Dt = Dp (1 - e^{-ct}) \quad (2), \text{ avec } t_0=0, Dt_0=0$$

Dans le cas d'un substrat composé de plusieurs sous-parties à vitesse de dégradation différente, on obtient alors l'équation suivante:

$$(2) \quad Dt = \sum_i Dp_i (1 - e^{-c_i t})$$

Dans le cas particulier des amidons, on considère qu'il y a deux fractions différentes: l'une, soluble, très vite dégradée (c_1 très grand), et une fraction progressivement dégradée (87).

Donc (2) $\Rightarrow Dt = Dp_1 (1 - e^{-c_1 t}) + Dp_2 (1 - e^{-c_2 t})$. Mais avec c_1 très grand, on obtient alors: $e^{-c_1 t} \approx 0$ pour tout $t > 0$

$$D'où: Dp_1 (1 - e^{-c_1 t}) \approx Dp_1 \text{ pour } t > 0$$

$$\text{Et } Dt = Dp_1 + Dp_2 (1 - e^{-c_2 t})$$

Cette formule est celle qui est couramment utilisée dans les calculs de cinétique de dégradation des amidons, en posant:

- . $Dp_1 = a$ = fraction soluble très rapidement dégradable, en %
- . $Dp_2 = b$ = fraction progressivement dégradable, en %
- . $c_2 = c$ = vitesse de dégradation de la fraction b, en % / h.

On obtient:
$$Dt = a + b(1 - e^{-ct})$$

Cette formule caractérise les cinétiques de dégradation des amidons en fonction du temps.

REMARQUE: Si l'on veut prendre en compte le temps de latence qui précède le début des fermentations, il suffit de maintenir $t_0 \neq 0$ et ainsi t_0 est alors ce temps de latence (cela revient à effectuer un changement de repère dans l'échelle du temps).

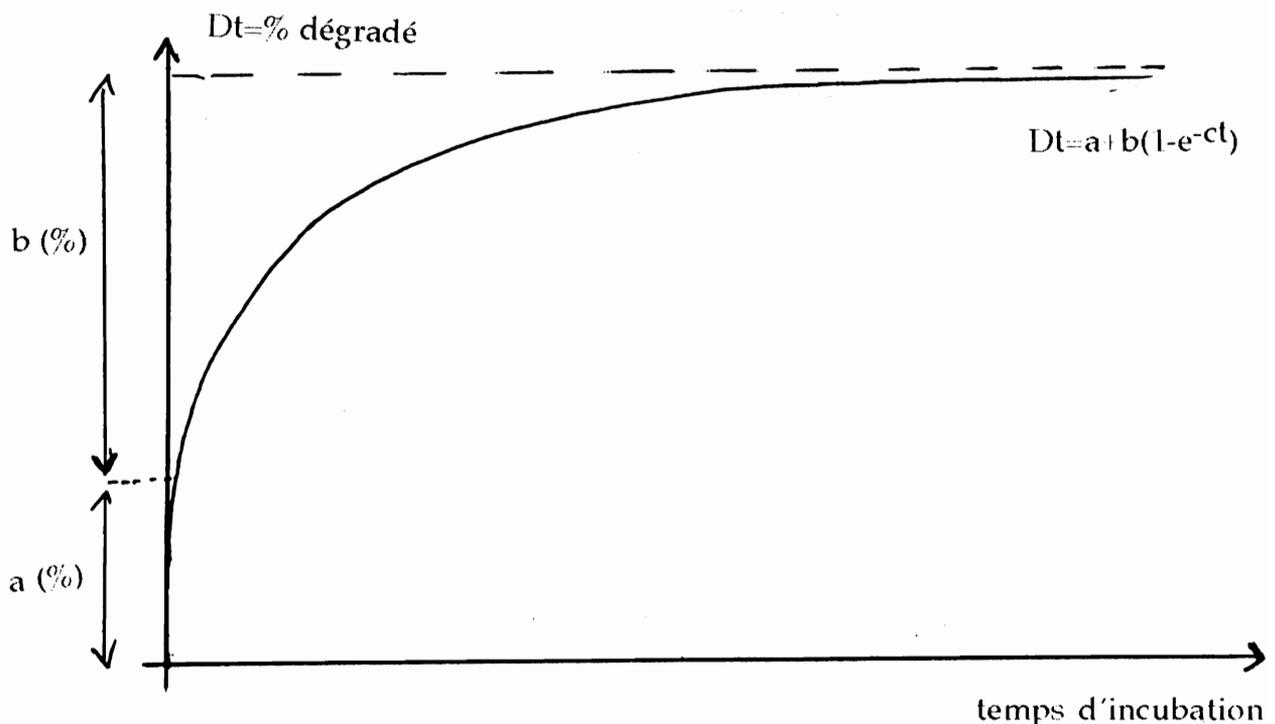


Figure 17: Cinétique de dégradation in sacco des amidons: courbe générale.

Aliment	n	a	b	c
Avoine	3	95,7	4,3	11
Blé	4	70,8	29,3	19,4
Maïs	5	23,4	76,6	4,9
Orge	7	59,3	40,7	32,2
Pois	4	41,4	58,6	16,3
Sorgho	2	17,8	82,3	4,4

(n = nombre de références)

Tableau 3: Valeurs des paramètres de dégradation in sacco de l'amidon des principaux aliments (d'après Chapoutot, 1993, synthèse bibliographique, in (90))

En fonction des valeurs de ces paramètres, l'allure de la courbe sera alors légèrement différente, en fonction notamment des proportions relatives de a et b, et de la valeur de c (voir **figure 18** page 39). Nous parlerons alors d'amidons à dégradation "lente" ou "rapide".

b) Prise en compte du taux de sortie des particules:

Les modèles que nous avons vus sont des modèles statiques, où l'on a étudié les cinétiques de dégradation "in sacco" (donc sans tenir compte du transit physiologique des pré-estomacs) (88)(89).

Mais le rumen est un système ouvert et l'on doit tenir compte de ce paramètre supplémentaire, pour arriver à des valeurs de dégradabilité théorique intraruminale.

Deux modèles expérimentaux de transit des particules (en l'occurrence, les concentrés) ont été proposés :

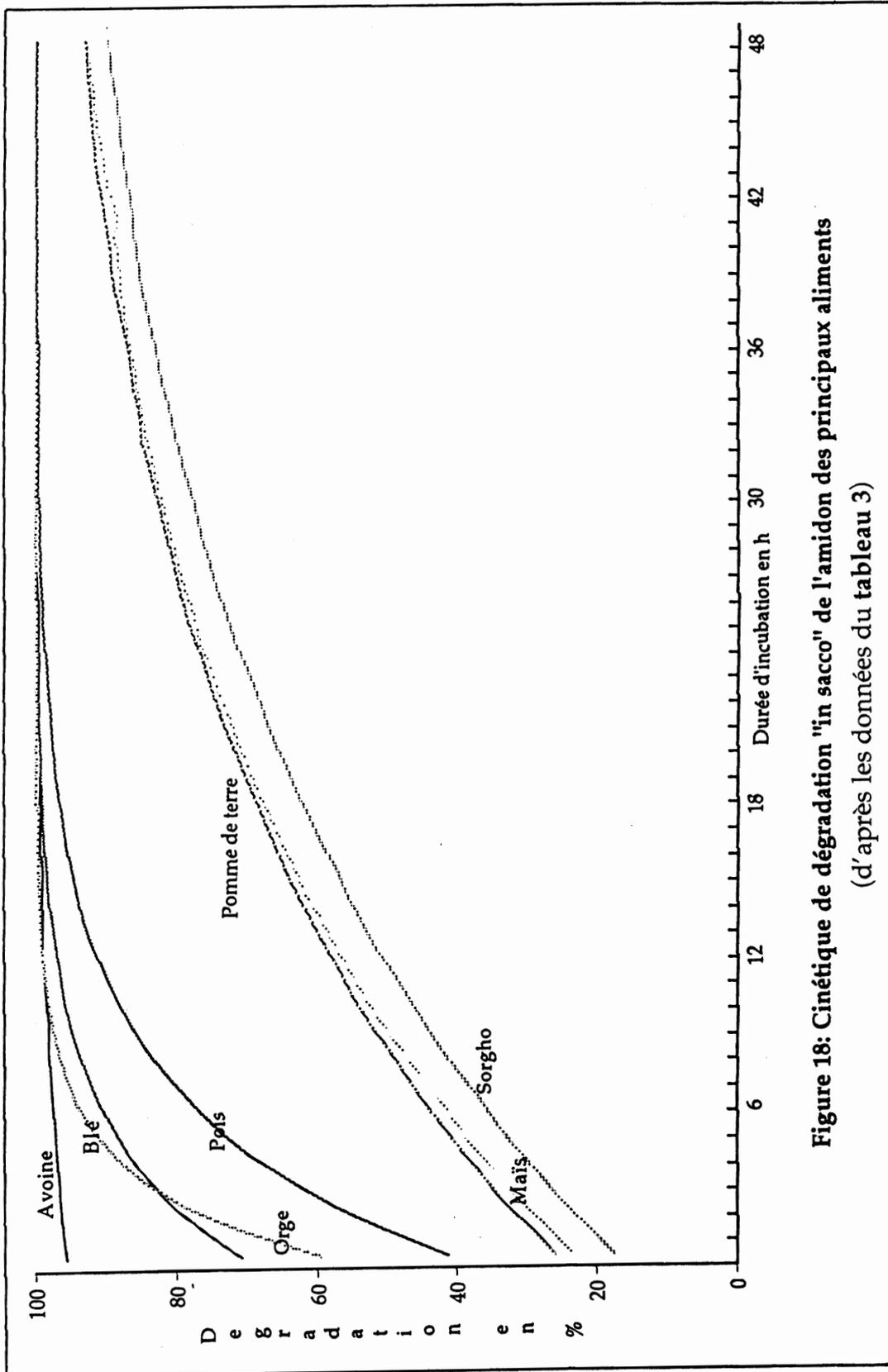


Figure 18: Cinétique de dégradation "in sacco" de l'amidon des principaux aliments
(d'après les données du tableau 3)

->**Modèle de Owens et Gøetsch (1986)** applicable aux bovins (88):

$$kpc = 1,3 + 0,61 \times CI + 4,88 \times FI - 1,25 \times (FI)^2 \quad \text{avec:}$$

kpc = vitesse de transit des concentrés en %/heure

CI = concentrés ingérés en g/kg PV^{0,75}

FI = fourrages ingérés en g/kg PV^{0,75} (n=70, R²=61)

->**Modèle de Sauvant et Archimède (1990)** applicable aux bovins et aux petits ruminants (88)(89):

$$kpc = -0,424 + 1,454 \times kpf \quad (n=36; R= 0,86, \text{etr}= 0,78) \text{ avec:}$$

$kpf = 0,35 + 0,022 \times MSI + 0,0002 \times (\%F)^2$ chez les bovins

$kpf = 0,75 + 0,046 \times MSI + 0,0002 \times (\%F)^2$ chez les petits ruminants

avec: MSI = matière sèche ingérée en g/kg PV^{0,75}

kpf = vitesse de transit des fourrages

%F = % de fourrage dans le régime

Ainsi la dégradation effective d'un concentré devient:

$$DT = a + bc / (c + kpc) , \text{ avec:}$$

a = fraction soluble (en %)

b = fraction progressivement dégradabile (en %)

c = vitesse de dégradation de b (en %/heure)

kpc = taux de sortie des particules de concentré (en %/heure)

Avec la prise en compte du transit et en prenant la valeur moyenne de 6% par heure couramment retenue (90), on parvient à calculer des valeurs de dégradabilité théorique (DT6) des amidons :

$$DT6 = a + bc / (c+6)$$

Avoine	Blé	Maïs	Orge	Pois	P. de terre	Sorgho
98,5	93,1	57,9	93,6	84,2	59,3	52,5

Tableau 4 : Valeurs moyennes de DT6 de l'amidon des principaux aliments (Sauvant, Chapoutot et Archimède, synthèse bibliographique, 1994, in (90))

On peut dès lors classer les aliments à amidon "rapide" ($DT6 > 90\%$, $a > 60\%$, et $c > 10\%$) et "lent" (90):

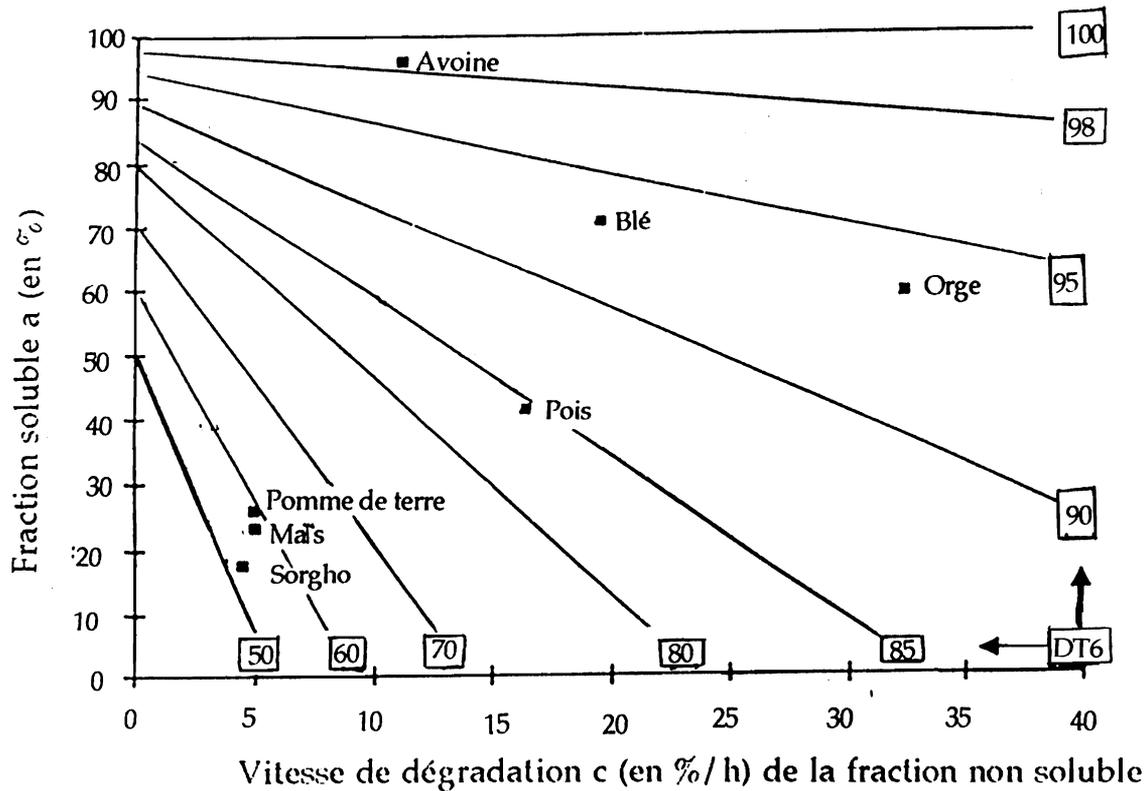


Figure 19: Valeur de la dégradabilité théorique $DT6$ en fonction des paramètres a et c (d'après P. Chapoutot, 1993, synthèse bibliographique, in (9)).

Mais si l'on compare ces valeurs théoriques (obtenues à partir des expériences "in sacco") avec les mesures "in vivo" (méthode de la canule duodénale) on s'aperçoit que la digestibilité des amidons rapides (avoine, orge, blé) est surestimée et celle des amidons lents (maïs, sorgho, pomme de terre) sous-estimée, ceci pouvant s'expliquer par une dispersion de l'amidon hors des sachets de nylon, qui disparaissent et sont donc considérés comme dégradés et/ou par la séquestration d'une partie de l'amidon par les protozoaires (cf I-A) qui quittent les sachets de nylon alors qu'ils sont considérés au niveau duodénal comme de l'amidon non digestible, ou par les conditions écologiques particulières qui règnent dans les sachets (8)(89)(90).

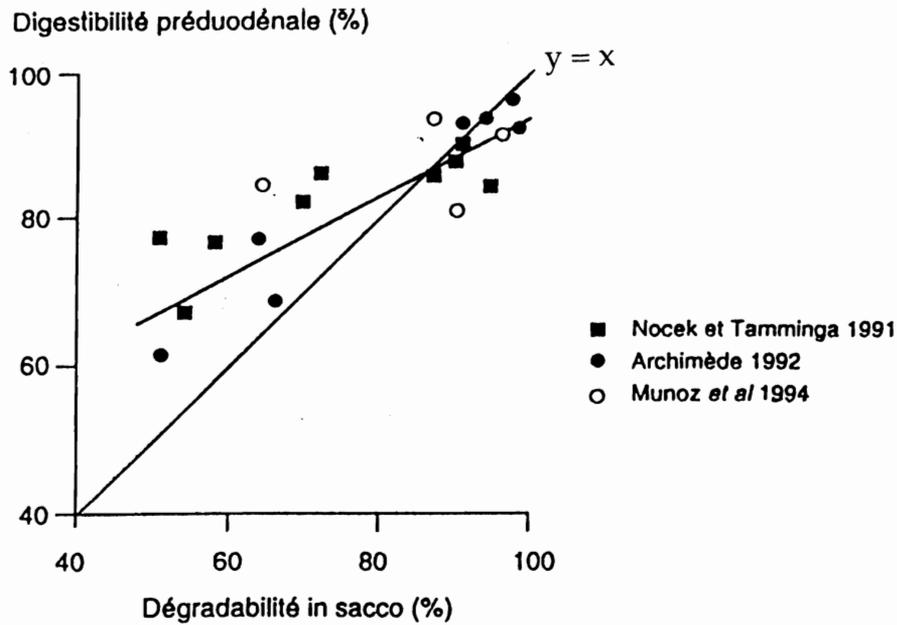


Figure 20: Relation entre la digestibilité préduodénale de l'amidon et sa dégradabilité théorique DT6 in sacco (90)

L'équation de prédiction de la digestibilité préduodénale de l'amidon (DIA) est alors (90):

$$\text{DIA} = 0,483 \times \text{DT6} + 45,62 \quad (r^2=0,71)$$

Résumé des formules (4 étapes de calcul):

- 1- $D(t) = a + b(1 - e^{-ct})$
- 2- avec le transit (kp), $DT = a + bc/(c + kp)$
- 3- avec le transit moyen $kp = 6\%/ \text{heure}$, $DT6 = a + bc/(c + 6)$
- 4- correction théorique / "in vivo": $\text{DIA} = 0,483 \times \text{DT6} + 45,62$

Soit: $\text{DIA} = 0,483 \times [a + bc/(c + 6)] + 45,62$

Avec: DIA : digestibilité préintestinale de l'amidon, en %

a : fraction soluble, en %

b : fraction progressivement dégradable, en %

c : vitesse de dégradation de la fraction b, en %/h

6 : taux de sortie des particules couramment retenu, en %/h

A partir de là on peut , connaissant la teneur en amidon des aliments et ses paramètres de dégradation a, b et c, estimer la quantité d'amidon digestible dans le rumen et par soustraction la quantité d'amidon non dégradé dans le rumen, appelé couramment amidon protégé ou amidon "by pass":

Aliments	DT6 %	Amidon ⁽²⁾ g/kg MS	Amidon soluble g/kg MS	Amidon digestible ⁽²⁾ dans le rumen g/kg MS	Amidon protégé ⁽¹⁾ g/kg MS
Avoine	98,5	400	383	373	27
Blé	93,1	690	489	625	65
Maïs	57,9	740	173	545	195
Orge	93,6	595	353	541	54
Pois	84,2	520	215	449	71
Pomme de terre	59,3	740	192	549	190
Sorgho	52,5	740	132	525	215

Tableau 5 : Dégradabilité théorique des amidons et estimation des teneurs en amidon soluble, digestible et "by-pass" des principaux aliments des ruminants (90).

On constate alors d'importantes variations de dégradation de l'amidon d'un aliment à l'autre.

Voyons maintenant les origines de ces différences entre aliments, ainsi que les autres facteurs de variation de dégradabilité des amidons, car les valeurs présentées jusque-là sont des valeurs moyennes, donc susceptibles de varier aussi.

B- FACTEURS DE VARIATIONS DE LA DEGRADATION DES AMIDONS:

Les diverses expériences d'étude de cinétique de dégradation de l'amidon révèlent des disparités importantes entre les aliments.

Nous verrons que même si les composants de l'amidon lui-même peuvent jouer un rôle dans sa digestion, de nombreux autres facteurs ont davantage d'influence sur sa dégradabilité. En effet, dans les grains de céréales, les granules d'amidon, situés dans l'endosperme, sont imbriqués dans une matrice protéique dont l'agencement est variable selon les grains.

Par ailleurs, du fait de l'organisation structurale des grains, il se pose un problème d'accessibilité aux granules d'amidon par la micropopulation amylolytique, qui peut être corrigé par des traitements mécaniques. Aussi des traitements chimiques et/ou physiques peuvent, sur un aliment donné, avoir une influence sur la dégradabilité de son amidon. Enfin, il y a des causes indépendantes de l'aliment lui-même.

1- Influence minime de la nature de l'amidon

Du fait des différences de structure de l'amidon d'une espèce de céréale à l'autre, voire d'une variété à l'autre, on a souvent pensé que celles-ci expliquaient la variabilité de la dégradation (96), puisque la digestibilité enzymatique de l'amidon est en général inversement proportionnelle à sa teneur en amylose (13)(82). Mais il semble que la digestion ruminale ne suive pas toujours cette règle: en effet, certaines variétés de maïs à teneur élevée en amylose (appelées "amylose-extender") ont présenté une digestibilité ruminale de l'amidon supérieure à celle des variétés normales (59). Aussi des expériences menées par Mc Allister et al. avec du maïs et de l'orge ont montré la faible différence de dégradation d'amidon isolé in vitro par un mélange de microorganismes ruminiaux (53), comme le montre la **figure 21** page 45.

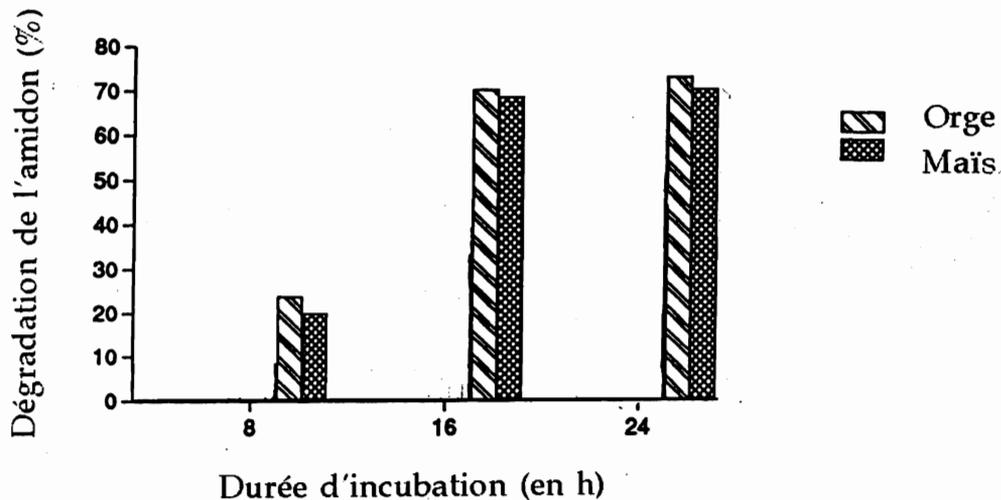


Figure 21: Digestion comparée in vitro de l'amidon isolé de maïs et d'orge (d'après Mc Allister et Al, 1992) (53)

Nous constatons alors que la nature de l'amidon n'explique pas à elle seule les différences observées entre céréales in sacco.

2- Rôle prépondérant de la structure de l'endosperme

Comme nous l'avons évoqué dans la première partie l'amidon est essentiellement situé dans l'endosperme (ou albumen) des grains de céréales.

L'endosperme se compose de deux parties (40)(59)(75)(25):

- > La couche à aleurones, périphérique, qui contient surtout des protéines.

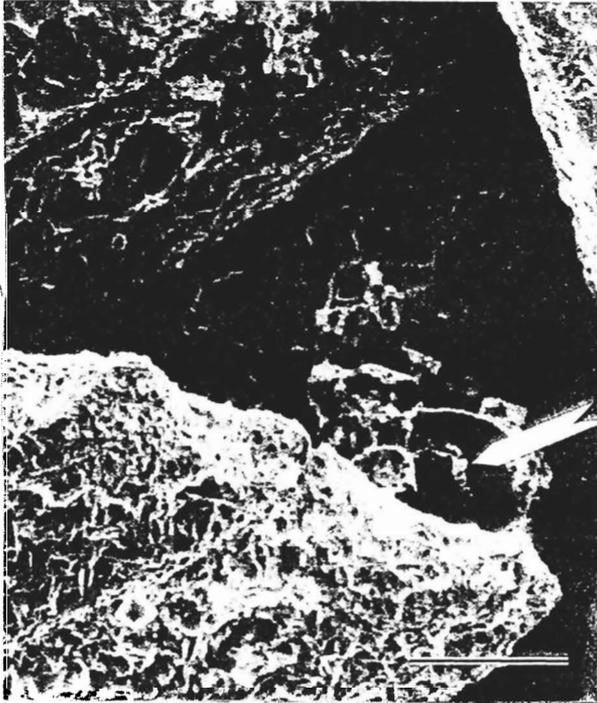
- > L'endosperme amylicé qui comprend lui même deux parties:

- l'endosperme corné, juste en-dessous de la couche à aleurones, qui contient des granules d'amidon imbriqués dans une matrice protéique plus ou moins dense selon les espèces et les variétés;

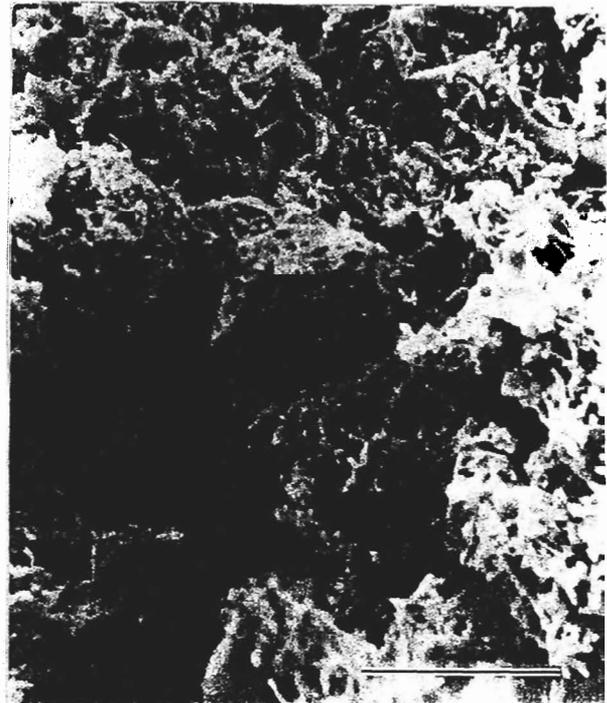
- l'endosperme farineux, central, qui contient de nombreux granules d'amidon plus libres (beaucoup moins de cellules et de protéines), quelques sucres solubles et de la pectine. La structure est plus lâche avec des espaces entre les granules (25)(40)(75)(59)(77).

Des observations au microscope électronique (voir **figure 22** page 46) montrent que l'endosperme corné est beaucoup moins colonisé que l'endosperme farineux par les microorganismes, et nettement moins endommagé après 48h

d'incubation dans le rumen; il est donc plus résistant à la digestion microbienne (40).



Endosperme corné: faible colonisation microbienne
(échelle=20µm)



Endosperme farineux: colonisation massive
(échelle=5µm)

Figure 22 : Endosperme de maïs observé au microscope électronique après 48H d'incubation dans le rumen (40)

Du fait de cette différence de dégradabilité entre les deux zones, leurs proportions dans les grains vont influencer la vitesse de dégradation de l'amidon.

Par ailleurs, d'une espèce à l'autre, la nature même de l'endosperme corné est variable, notamment en relation avec la nature des protéines qu'il contient.

a- Variations selon les espèces:

Nous avons vu dans la partie précédente que les résultats des nombreuses expériences de dégradation des amidons sont tous convergents: l'amidon de l'avoine, du blé et de l'orge est plus vite dégradé que celui du maïs et du sorgho.

Or, l'endosperme du sorgho, et du maïs dans une moindre mesure, a une couche cornée plus importante que les autres grains, qui de plus est très dense,

de, et comprend des protéines peu solubles voire insolubles (glutalines, prolamines) qui assurent ainsi une protection des granules d'amidon contre l'attaque microbienne (25), puisque la colonisation est freinée comme le révèlent les observations au microscope électronique (40)(96).

Par ailleurs dans le cas du sorgho, ces protéines sont très liées entre elles, renforçant ce rôle de barrière (82).

Dans le maïs, c'est la présence en grande quantité de α -zéine particulièrement peu dégradable qui explique en partie cet effet "barrière".

Dans les grains d'orge et de blé, en revanche, l'endosperme est à peu près homogène et de structure farineuse partout, c'est-à-dire que la matrice protéique est beaucoup plus lâche (54). En outre les protéines contenues dans l'endosperme de blé et d'orge sont plus solubles que celles du maïs et du sorgho. En moyenne, l'avoine contient 67% de protéines solubles, l'orge environ 25%, le blé environ 16%, le sorgho 15%, et le maïs environ 6% (47). La dégradabilité de ces protéines s'en ressent, ainsi que celle de l'amidon imbriqué dans la matrice protéique. C'est ce que montrent les résultats ci-dessous, où l'on constate le parallèle entre la dégradation des protéines et de l'amidon des différents grains (33):

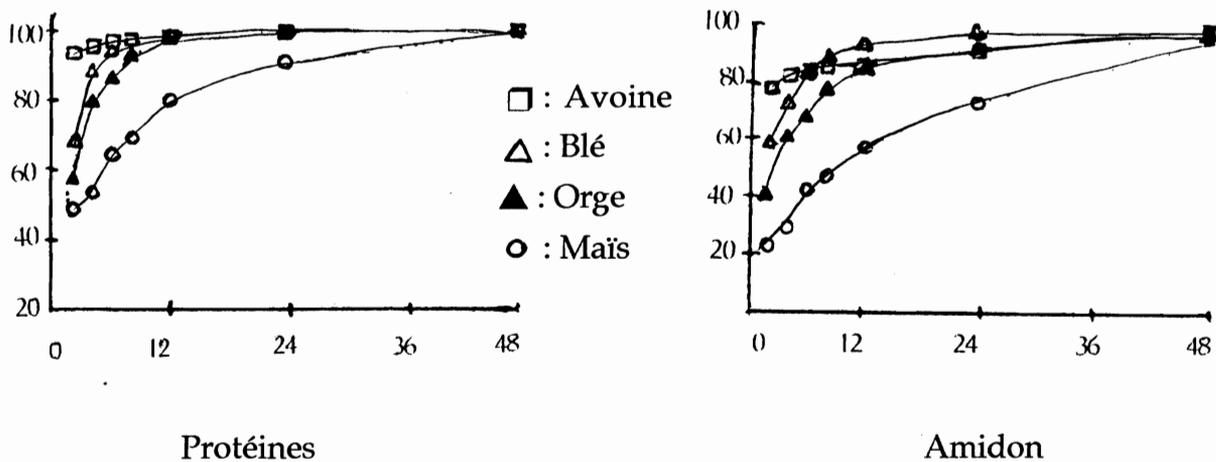


Figure 23 : Cinétique de dégradation des protéines et de l'amidon des grains d'avoine, d'orge, de blé et de maïs (33)

De même Mc Allister et al. ont observé que la digestibilité de l'amidon de maïs par un inoculum ruminal in vitro était améliorée par un ajout de protéases (53).

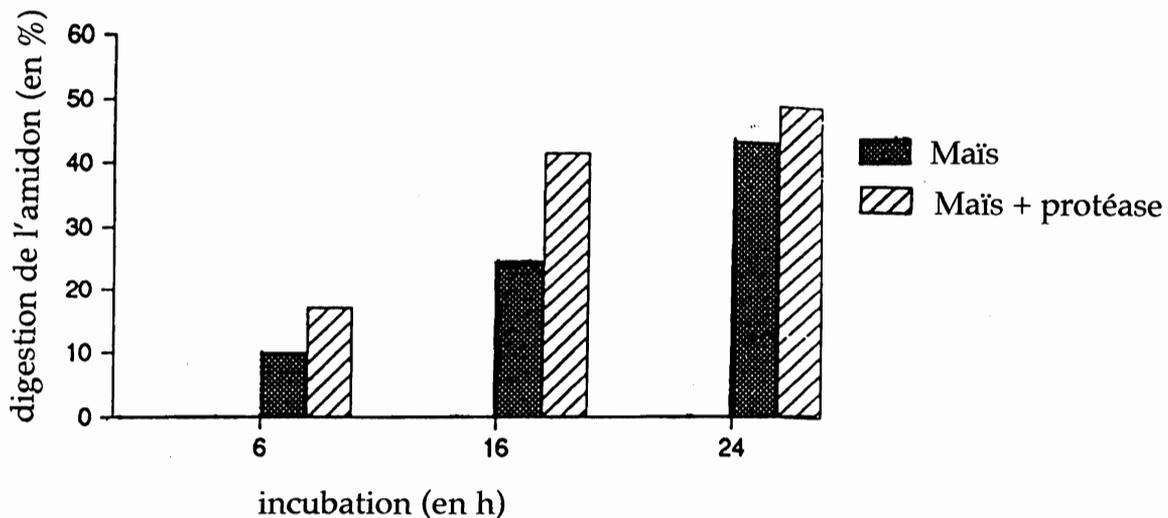


Figure 24: Effet de l'ajout de protéase sur la dégradation in vitro de l'amidon de maïs (d'après Mc Allister et al., 1992)(53)

Ainsi la structure de l'endosperme et notamment le rapport entre la partie cornée et farineuse conditionnent la dégradabilité de l'amidon.

Mais entre les céréales à dégradation rapide, il y a aussi des différences liées à la couche à aleurones. Le blé présente une couche à aleurones épaisse qui retarde la dégradation; et, dès qu'elle est détruite, la dégradation de l'amidon s'accélère.

b- Variation en fonction du génotype:

Les amidons de sorgho et de maïs ont des dégradabilités faibles en général liées à l'existence de cette couche d'endosperme corné, mais certaines variétés présentent une meilleure dégradabilité.

Pour le maïs, d'importantes différences ont été observées entre les variétés "cornées" et "dentées" qui diffèrent dans leurs proportions relatives d'endosperme corné et farineux, c'est à dire la vitrosité (proportion en masse d'endosperme corné dans le grain dégermé) (77). Les variétés cornées ("flint") possèdent plus de 70% d'endosperme vitreux, plus dense avec une matrice protéique plus importante, soit une vitrosité de 71,8% en moyenne. Tandis que les variétés dentées ("dent") présentent en moyenne une vitrosité de 51,4%.

Ainsi les paramètres de dégradation (fraction soluble "a" et vitesse "c" de dégradation de la fraction progressivement dégradabile "b") sont nettement supérieurs pour les variétés dentées (75)(76)(77), comme le montre le tableau ci-dessous:

Variétés	Dentées	Cornées
Vitrosité (%)	51,4	71,8
fraction soluble "a" (%)	26,6	19,4
fraction progressivement dégradabile "b" (%)	73,4	80,6
vitesse "c" de dégradation de b (%/h)	5,9	3,9
DT6 ($k_{pC=6\%}$) (%)	61,9	46,2
Perte de particules (%)	12,9	5,7

Tableau 6 : Influence de la texture du grain de maïs sur la dégradation de l'amidon (D'après Philipeau et al. , 1998) (77)

Il en résulte une dégradabilité effective DT6 supérieure d'environ 15% pour les variétés dentées.

De même il existe des variétés de maïs appelées "high-lysine" (c'est-à-dire riches en lysine ="HL") ou "opaque-2". Elles présentent une teneur en β, δ et notamment α zéine diminuée et en compensation une quantité accrue de globulines et albumines, glutélines et γ -zéine, protéines qui ont une solubilité supérieure (16). La matrice protéique, alors moins dense, confère à l'endosperme une vitrosité moindre, d'où le meilleur accès aux granules d'amidon qui sont plus libres et une digestibilité augmentée (16)(59). Des expériences de dégradation in vitro ont montré une nette augmentation de la dégradation en faveur de la variété riche en lysine "HL" sur la variété normale "NL".

Présentation-Variété	Dégradation de l'amidon en %MS, après 6 heures d'incubation	Dégradation de l'amidon en %MS, après 12 heures d'incubation
Broyage fin- H.L.	40,2	89
Broyage fin- N.L.	29,6	78,5
Broyage grossier- H.L.	16,9	70,6
Broyage grossier- N.L.	14,7	47,7

Tableau 7 : Comparaison de la digestibilité ruminale de l'amidon de maïs de variété "high-lysine"(HL) et normal (NL) (16)

Des synthèses de données expérimentales ont d'ailleurs permis de vérifier la relation entre la dégradation de l'amidon et la teneur en α , β , δ zéine de l'endosperme:

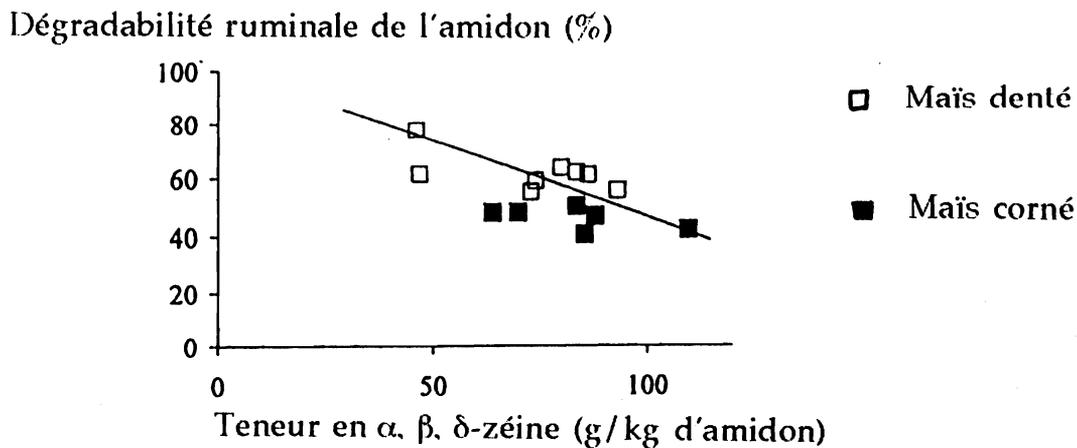


Figure 25: Relation entre la teneur en α , β , δ zéine et la dégradabilité ruminale de l'amidon (59)

REMARQUE: L'inconvénient de cette variété riche en lysine est sa fragilité (lors des récoltes et des manipulations) du fait de la tendreté de l'endosperme.

Pour le sorgho et éventuellement le maïs, il existe aussi des variétés cireuses ("waxy"), riches en amylopectine, ayant un endosperme moins dense. Il est plus uniforme, sans cette couche périphérique très dure (caractéristique du sorgho), d'où le meilleur accès aux granules d'amidon et une dégradabilité accrue (39)(82)(96).

c- Variations en fonction du stade de récolte:

Les expériences réalisées sur le maïs ont montré une influence du stade de maturité sur la vitrosité des grains, donc sur la dégradabilité de l'amidon. La vitrosité augmente en effet avec l'avancement de la maturité et la différence entre les variétés "dentée" et "cornée" s'accroît. Il en résulte une diminution de digestibilité ruminale de l'amidon avec l'avancement de la maturité; cette diminution étant beaucoup plus forte pour les variétés "cornées" que pour les variétés "dentées"; ainsi, la dégradabilité entre les deux variétés est voisine aux premiers stades, puis la différence augmente.

	Variété "dentée"		Variété "cornée"	
Jour après la "soie"	22	78	22	78
Vitrosité (%)	38,3	72,3	26,5	48,1
"a" (%)	49,5	25,2	52,6	15,7
"b" (%)	50	74,8	46,7	84,3
"c" (%/h)	19	4,3	9,3	3,3
D.T.5 (avec $k_{pc}=5\%/h$)	88,2	61,3	82,7	40,1

(Avec a=fraction soluble, b=fraction progressivement dégradabile, c=vitesse de dégradation de b, et DT5= dégradabilité théorique avec un taux de sortie de 5%/h; et la "soie" correspondant à l'ensemble des stigmates des fleurs femelles qui dépassent de l'épi).

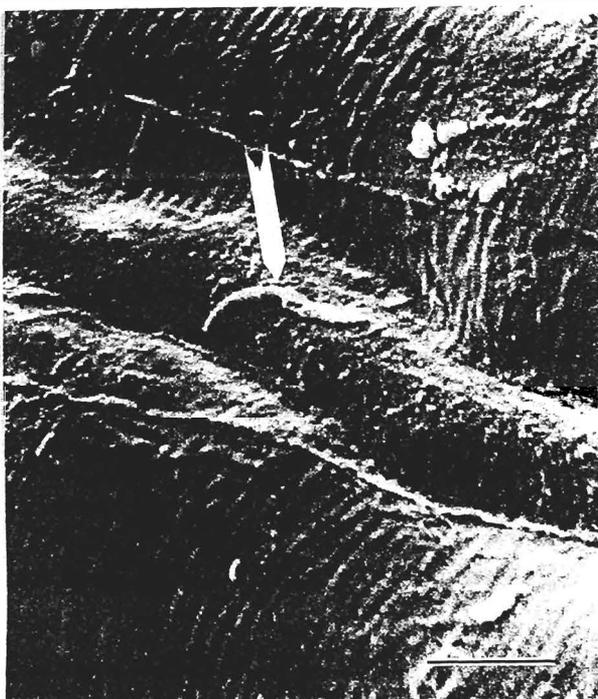
Tableau 8 : Influence du stade de récolte des grains de maïs sur la digestibilité ruminale de l'amidon (75)

D'après tous ces résultats, on constate alors qu'il y a un lien étroit entre la vitrosité des grains et la digestibilité ruminale de l'amidon (75).

3- Influence des traitements mécaniques:

Le péricarpe des grains, constitué de 90% de fibres (54), constitue une véritable barrière à l'attaque par les microbes, ceux-ci ayant des difficultés pour adhérer à cette enveloppe (3)(51)(40)(83), comme l'illustre l'observation au microscope électronique ci-dessous (**figure 26**):

On constate la très faible colonisation microbienne et le faible degré d'endommagement du péricarpe après 48h d'incubation dans le rumen.



La flèche montre une bactérie

Echelle = 5µm

Figure 26: Aspect du péricarpe de maïs après 48H d'incubation dans le rumen (d'après Mc Allister, non publié, in (40))

C'est ainsi que des grains entiers présentent une dégradabilité in sacco très faible, avec notamment un temps de latence élevé (15).

Ainsi, bien que pendant l'ingestion les bovins endommagent (plus ou moins selon les grains) ce péricarpe, ce qui permet une meilleure digestibilité comme le montre le **tableau 9** page 53, des traitements mécaniques visant à le désolidariser sont souhaitables pour éviter le gaspillage, notamment pour les grains de petite taille tels que l'orge et le blé, qui ne peuvent "exprimer" leur haute dégradabilité

sans ce traitement minimum (3)(46)(57).

Le maïs, en revanche, davantage endommagé pendant la mastication, est moins tributaire de ce type de traitement mécanique puisque la mastication permet à elle seule un gain de digestibilité (3).

	Orge	Maïs	Blé	
Fraction soluble = a (%)	1,1	2,1	1,7	Entier
	7,4	6,2	2,9	Mastiqué
Fraction progressivement dégradable = b (%)	37,8	30,3	59,2	Entier
	64,8	77,2	90,9	Mastiqué
Vitesse de dégradation de b = c (%/h)	2,67	1,77	0,37	Entier
	3,88	2,27	3,6	Mastiqué
Temps de latence en h	1,4	NC	2,1	Entier
	0	NC	0,2	Mastiqué
D.T.6 en%	38	31,4	52,6	Entier
	71,2	81,4	92,3	Mastiqué

Tableau 9 : Paramètres de dégradation de l'amidon des grains entiers et mastiqués par des bovins adultes (3)

Quant aux petits ruminants, la mastication est plus efficace, rendant ce traitement minimum non indispensable quels que soient les grains considérés (30).

Nous verrons donc les deux niveaux de traitement mécanique des grains et leur effet sur la dégradabilité de l'amidon:

- La rupture du péricarpe, qui permet l'accès des microbes à l'endosperme;
- Le broyage et la mouture, qui permettent en outre de diminuer la taille des particules donc d'augmenter la surface d'attaque pour les microorganismes.

a- Rupture du péricarpe: le traitement minimum:

Le traitement minimum le plus courant est l'aplatissage. Il permet simplement de rompre le péricarpe et favorise l'accès aux bactéries (38)(92). D'une façon générale, les grains aplatis présentent une meilleure dégradabilité

qu'entiers, qui se répercute sur la dégradation de l'amidon, notamment chez les animaux âgés dont les dents perdent de l'efficacité (57). Par exemple pour l'orge, le gain de digestibilité est d'environ 10 à 30% selon les sources expérimentales; en moyenne les gains sont supérieurs aux autres grains car l'enveloppe est très dure et épaisse, donc très peu attaquée en l'absence de traitement (38). En revanche, l'avoine, déjà très bien utilisée entière, ne montre guère d'évolution (gain de 4 à 5%)(62). Pour le blé, les résultats sont variés, mais ils montrent toujours la même tendance vers l'augmentation. En moyenne, pour les grains entiers la digestibilité est de 65 à 75%, alors que pour les grains aplatis, elle est de 85 à 90%. Pour le maïs, l'aplatissage modifie peu les résultats car les grains sont bien endommagés par la mastication (57). Pour le sorgho, l'endosperme corné étant très résistant l'aplatissage ne change rien (95).

En résumé, pour les bovins l'aplatissage est le minimum indispensable pour le blé et l'orge, inutile pour l'avoine et presque inutile pour le maïs (endommagé pendant la mastication) si c'est le seul traitement.

Ce niveau de traitement s'avère par contre inutile pour les petits ruminants.

b- Broyage et mouture:

Ces procédés permettent, outre la rupture du péricarpe, une diminution de la taille des particules favorisant la colonisation bactérienne par l'augmentation de la surface d'attaque (8)(13)(49)(83).

Il est important de noter à ce propos que la dureté des grains conditionne leur comportement face au broyage, à savoir que les grains durs et moins riches en humidité vont plus avoir tendance à éclater que les grains tendres qui seront davantage déformés, sans obtenir forcément une diminution de taille des particules, ou une taille supérieure à celle obtenue avec des grains durs (83); ceci explique parfois les différences de taille des particules obtenues entre les grains pour un même traitement (8).

D'une façon générale, on constate à travers les diverses expériences que la diminution de la taille des particules permet d'augmenter la dégradabilité et surtout la vitesse de dégradation de l'amidon.

Ainsi Mc Allister et al. (1992) (53) ont constaté une amélioration nette de la dégradation in vitro de l'amidon du maïs et d'orge entre les particules de 2 à 3mm et de 0,25 à 0,89mm (voir **figure 27** page 55).

digestion de l'amidon (en %)

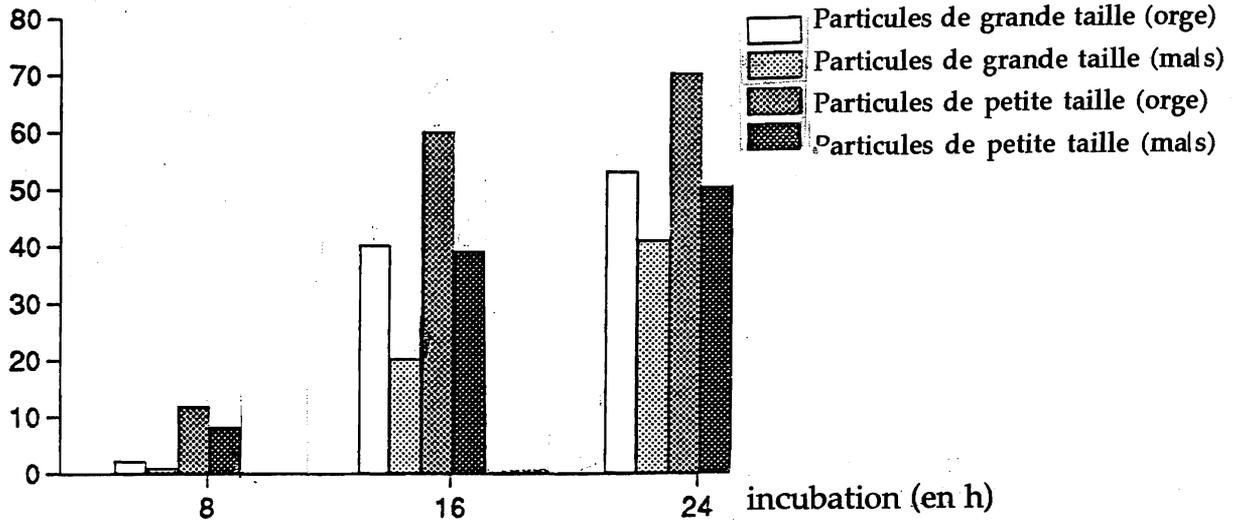


Figure 27: Effet de la taille des particules sur la dégradation in vitro de l'amidon de maïs et d'orge (53)

De même Lykos et Varga (49) ont mis en évidence la relation entre le niveau d'endommagement des grains de maïs et la dégradabilité des glucides non structuraux in situ, montrant la nette augmentation des paramètres de dégradation.

Taille des particules	≈ 80% > à 3mm Moyenne = 4,3mm	≈41% = 3mm ≈45% = 2mm Moyenne= 2,6mm	>95% ≤ 0,8mm Moyenne= 0,686mm
Fraction soluble= a(%)	3,6	3,9	20,4
Fraction dégradable=b(%)	96,4	97,1	85,2
Vitesse c (%/h)	4,4	6,3	9,1
DT6 (K _{pc} =6%/h) (%)	44,6	53,3	64

Tableau 10: Effet du type de traitement mécanique du grain de maïs sur les paramètres de dégradation in situ des glucides cytoplasmiques (49)

De nombreuses autres expérimentations (8)(26)(30)(76)(79) présentent des résultats similaires, à savoir que la diminution de taille des particules accélère la digestion ruminale de l'amidon en augmentant les valeurs de "a" et "c". Toutefois, il faut rester réservé quant à l'interprétation de ces résultats, car Philippeau fait remarquer que dans l'expérience qu'il a réalisée en comparant des grains fendus et broyés l'augmentation de "a" est à peu près équivalente au pourcentage d'amidon perdu à travers les pores (76). Ce phénomène pourrait alors fausser les résultats. Par ailleurs, Nocek (66) a fait également remarquer que les particules plus fines qui fuient à travers les pores des sachets sont aussi plus denses, donc se retrouvent dans les strates profondes du rumen et sont plus vite évacuées en dehors du rumen. Ces particules, plus vite éliminées, ne seront peut-être pas toutes dégradées dans le rumen alors qu'elles sont considérées comme telles puisque absentes du sachet à la fin de l'expérience. Par conséquent, la dégradabilité accrue (dans les expériences in situ) des formes finement broyées est à relativiser, car l'augmentation de "a" est biaisée par la sortie des particules (plus fines) en dehors des sachets, et par leur évacuation précoce du rumen.

Ainsi les traitements mécaniques, qui permettent l'accès aux couches profondes des grains (par la rupture du péricarpe) et même en augmentant la surface d'attaque (par le broyage, la mouture,...), facilitent la digestion de l'amidon. Mais pour les grains dont la matrice protéique est étroitement liée aux granules d'amidon (sorgho, maïs) ces traitements améliorent la digestibilité ruminale, mais moins que ce que l'on pourrait espérer, en raison du transit plus rapide lié à la diminution de taille des particules.

Etant donné qu'il existe une taille critique des particules pour la sortie rapide du rumen estimée à 1,8mm par Poppi et al. (1980), in (66), il y a sans doute une taille optimale de ces particules correspondant au meilleur compromis entre une dégradation assez rapide et une sortie du rumen pas trop précoce. On peut alors supposer que cette taille optimale est propre à chaque aliment, puisque l'effet de l'augmentation du taux de sortie du rumen ne sera pas le même pour un amidon "lent" et "rapide".

En effet, si on calcule la dégradabilité théorique DT avec $k_{pC}=6\%/h$ et $k_{pC}=10\%/h$ (valeur sans doute plus proche de la réalité pour des particules fines), on s'aperçoit que, si elle varie peu pour les amidons rapides (avoine, orge, blé),

elle diminue de 10% environ pour les amidons lents (maïs, sorgho); donc l'augmentation de la vitesse de sortie du réticulo-rumen atténuée pour ces aliments-là l'effet bénéfique sur la cinétique de dégradation du broyage ou de la mouture.

Ainsi, il peut être utile, à condition que ce soit économiquement rentable, d'appliquer d'autres types de traitements.

4- Influence des traitements physiques:

a- Les principaux traitements physiques

Ils peuvent avoir différents niveaux.

Un simple mouillage (= "tempering") des grains une vingtaine d'heures avant la distribution permet d'activer les enzymes endogènes en amorçant le processus de germination, et devrait améliorer de ce fait la dégradabilité, mais les expériences sur grains aplatis d'orge sont peu probantes pour l'instant (11)(39)(57)(83).

Les autres traitements sont hydrothermiques, éventuellement associés à des traitements mécaniques: ils reposent sur l'application de température croissante en présence d'eau en excès aboutissant à la désorganisation de la matrice protéique (dénaturation avec dégradation de la structure tridimensionnelle des protéines) et à un gonflement des grains d'amidon. Au-delà d'un seuil de température propre à chaque aliment (60°C en moyenne), le gonflement est irréversible: c'est la gélatinisation de l'amidon, avec disparition de la structure granulaire. A des températures encore plus élevées (environ 90°C), l'amidon est totalement solubilisé; mais ce niveau de traitement est encore peu utilisé pour l'alimentation des ruminants (30)(39)(49)(66)(83).

L'extrusion, par exemple, résulte de l'application de température très élevée en présence d'eau à forte pression: ce traitement, qui provoque une gélatinisation importante de l'amidon, est utilisé en particulier sur le pois, fournissant de bons résultats. On constate l'effet très bénéfique de l'extrusion, puisque sa dégradabilité dépasse alors celle du blé.

Amidon dégradé (%)

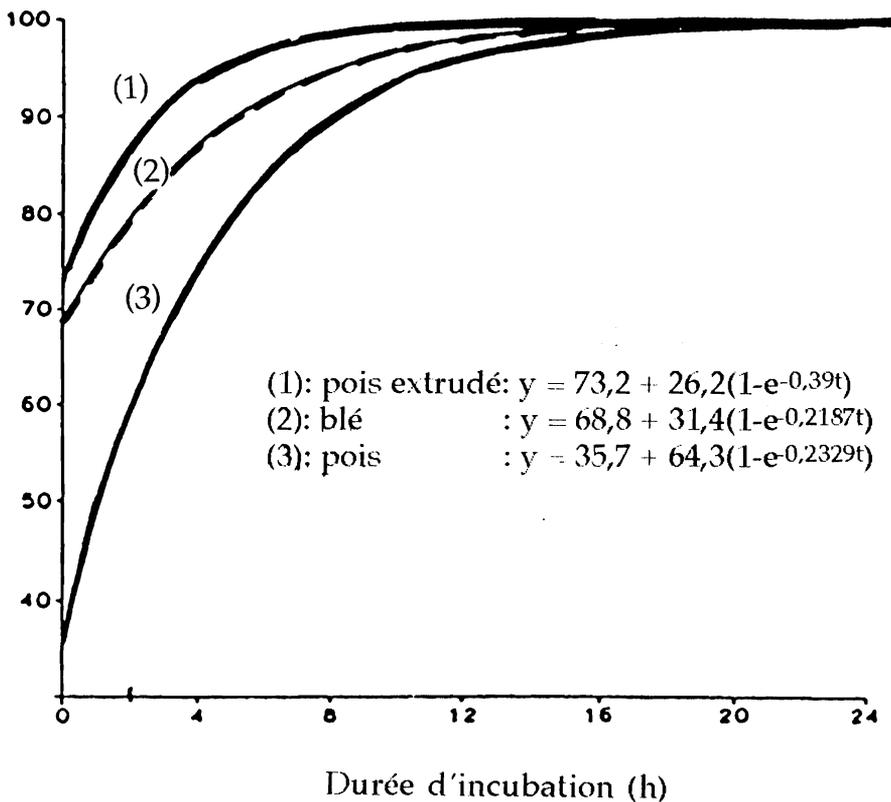


Figure 28: Influence du traitement d'extrusion sur la dégradation in situ de l'amidon de pois (Walhain et al., 1992)(98)

Ainsi, Preston et al. (1993) et Huntington (1997) ont révélé que l'augmentation de dégradabilité est en fait proportionnelle au pourcentage d'amidon gélatinisé, jusqu'à 60% environ (39).

Les nombreuses comparaisons de dégradation de l'amidon entre des traitements mécaniques et hydrothermiques montrent une amélioration très nette de ces derniers pour les amidons lents (environ 15%) (30)(95).

En particulier, Lykos et Varga (1995) ont montré l'amélioration des paramètres de dégradation des glucides non structuraux de maïs entre les formes traitées mécaniquement et floconnées à la vapeur, alors que les particules de ces dernières formes ne sont pas particulièrement petites (49).

Traitement	Mouture fine: farine	Floconnage à la vapeur
Taille des particules	Moyenne= 0,686mm	Moyenne= 2,896mm
Fraction soluble a (%)	20,4	33,3
Fraction progressivement dégradable b (%)	85,2	66,3
Vitesse c de dégradation de b (%/h)	9,1	10,5
DT6 (%)	64,5	75,4

Tableau 11 : Cinétique de dégradation de l'amidon de maïs après mouture fine ou floconnage à la vapeur (49)

En revanche, concernant les amidons rapides (blé, orge et avoine), les différences sont minimes (39)(40)(56)(57)(83).

Ainsi, comme le montrent toutes les expériences, l'effet des traitements hydrothermiques se répercute surtout sur les grains dont l'amidon est lentement dégradé tels que le maïs et le sorgho, comme le résume la figure ci-dessous. Notons aussi que ces traitements améliorent également la digestibilité intestinale, ce dont nous verrons l'intérêt ultérieurement.

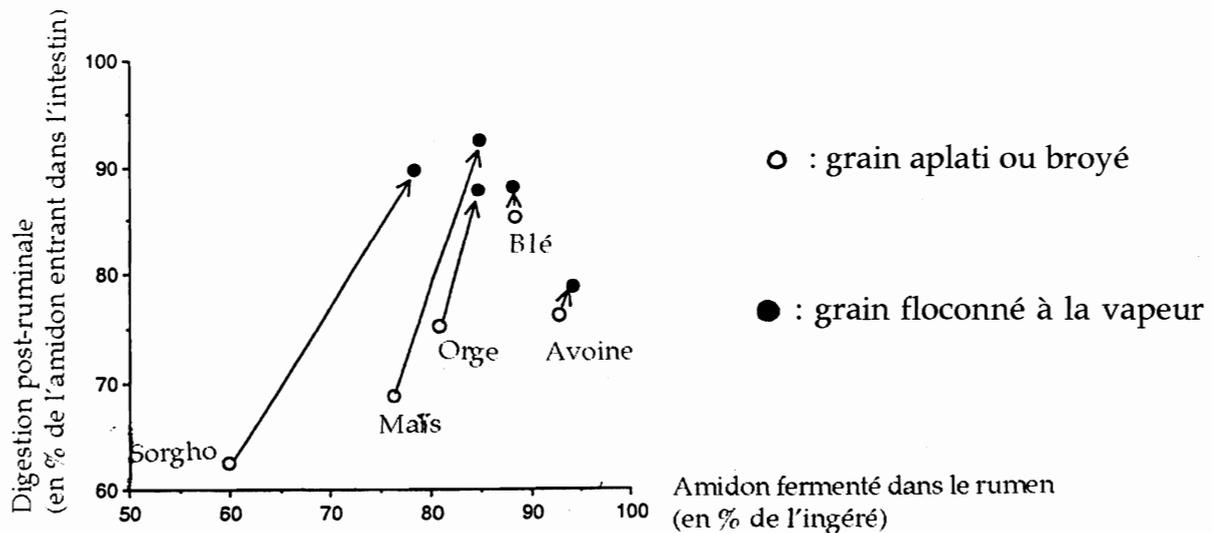


Figure 29 : Effet du floconnage à la vapeur sur la dégradation de l'amidon (83)

b- Cas particulier des grains ensilés :

Au cours des fermentations, il se produit une solubilisation partielle des protéines de l'endosperme d'où un accès aux granules d'amidon facilité pour les micro-organismes.

Ainsi, l'ensilage du maïs-grain permet une augmentation de la fraction soluble "a" quel que soit le génotype (denté ou corné), et qui se répercute sur la digestibilité ruminale qui gagne 6% environ (76).

			a (%)	b (%)	c (%/h)	DT6 (%)
Grain coupé	Variété dentée	Non ensilé	34,8	65,2	6,9	72,3
		Ensilé	37	62,6	10,2	78,6
Grain broyé	Variété cornée	Non ensilé	9,9	90,1	6,8	61,6
		Ensilé	31,1	68,6	5,5	67
Grain coupé	Variété dentée	Non ensilé	58	41,8	8,8	84,4
		Ensilé	77,6	22,4	7,6	91,1
Grain broyé	Variété cornée	Non ensilé	43,5	56,5	5,9	73,3
		Ensilé	55,8	44,2	7,4	82

(Avec a=fraction soluble, b=fraction progressivement dégradable, et c=vitesse de dégradation de b)

Tableau 12: Influence de l'ensilage des grains de maïs sur la digestion ruminale de l'amidon (76)

5- Influence des traitements chimiques

Alors que les traitements mécaniques et physiques sont appliqués pour rechercher une amélioration de la digestibilité ruminale, la pulvérisation de substances chimiques vise, selon la nature du produit utilisé, soit à améliorer aussi la dégradation ruminale (cas de la soude=NaOH et de l'ammoniaque=NH₃), soit à la réduire (formol), pour la compenser par la digestion enzymatique dans l'intestin grêle, pour des raisons que nous développerons ultérieurement.

Nous avons vu que les grains entiers donnés aux bovins résistent généralement à l'attaque microbienne du fait de l'enveloppe périphérique très

peu digestible.

L'application de substances alcalines (soude ou ammoniacale) en pulvérisation à raison de 35 à 45 g/kg de grains provoque une hydrolyse partielle des enveloppes des grains, ainsi qu'un gonflement des granules d'amidon périphériques, permettant un meilleur accès aux bactéries et une dégradabilité accrue. Concernant la soude, il semble que l'on obtienne avec des doses suffisantes une dégradabilité presque équivalente au traitement d'aplatissage (46)(54)(68). Concernant l'ammoniacale, les expérimentations sont encore peu nombreuses et les résultats pas toujours convergents, même si une tendance à l'augmentation de dégradabilité ressort, mais reste inférieure à l'aplatissage et au broyage. L'intérêt de ces procédés réside dans le fait que l'on pourrait donner aux animaux des grains entiers sans autre traitement (7)(46) et qu'ils permettent une digestion ruminale pas trop rapide, donc sans nuire à la digestion des fibres dans le rumen, favorisant même leur ingestion (58); d'où une substitution fourrage/concentré diminuée. Mais l'inconvénient est la nécessité d'une grande quantité d'eau d'abreuvement, et pour la soude, le danger lors de manipulations et la formation d'amas compacts peu appétibles après traitement (46).

Mais le principal produit chimique utilisé est le formaldéhyde, dont l'objectif est de réduire la digestion ruminale au profit de la digestion dans l'intestin grêle. Il agirait à deux niveaux: Fluharty et Loerch (1989) pensaient qu'il favorisait la formation de liaisons entre protéines et amidon, freinant ainsi la digestion ruminale (27). Mais d'après des observations au microscope électronique d'endosperme d'orge, il semble que cette diminution soit davantage liée à la protection des protéines induites par le formol (par des liaisons avec des groupes amines libres); en effet elles révèlent le ralentissement de la dégradation de la matrice protéique englobant les granules d'amidon et le moins bon accès des microorganismes aux granules d'amidon (52).

On voit en effet très nettement la faible colonisation bactérienne de l'orge traité par rapport à l'orge non traité, de même que la différence d'endommagement de l'endosperme après 12h d'incubation entre les grains traités et non traités. De même à 24h, on voit le retard important de la dégradation de la matrice protéique de l'orge traité et non traité. En revanche, au-delà d'une certaine durée d'incubation (supérieure à 24h), l'endosperme du grain traité est aussi très endommagé; les granules d'amidon ont été dégradés et seule la matrice protéique a partiellement résisté (52).

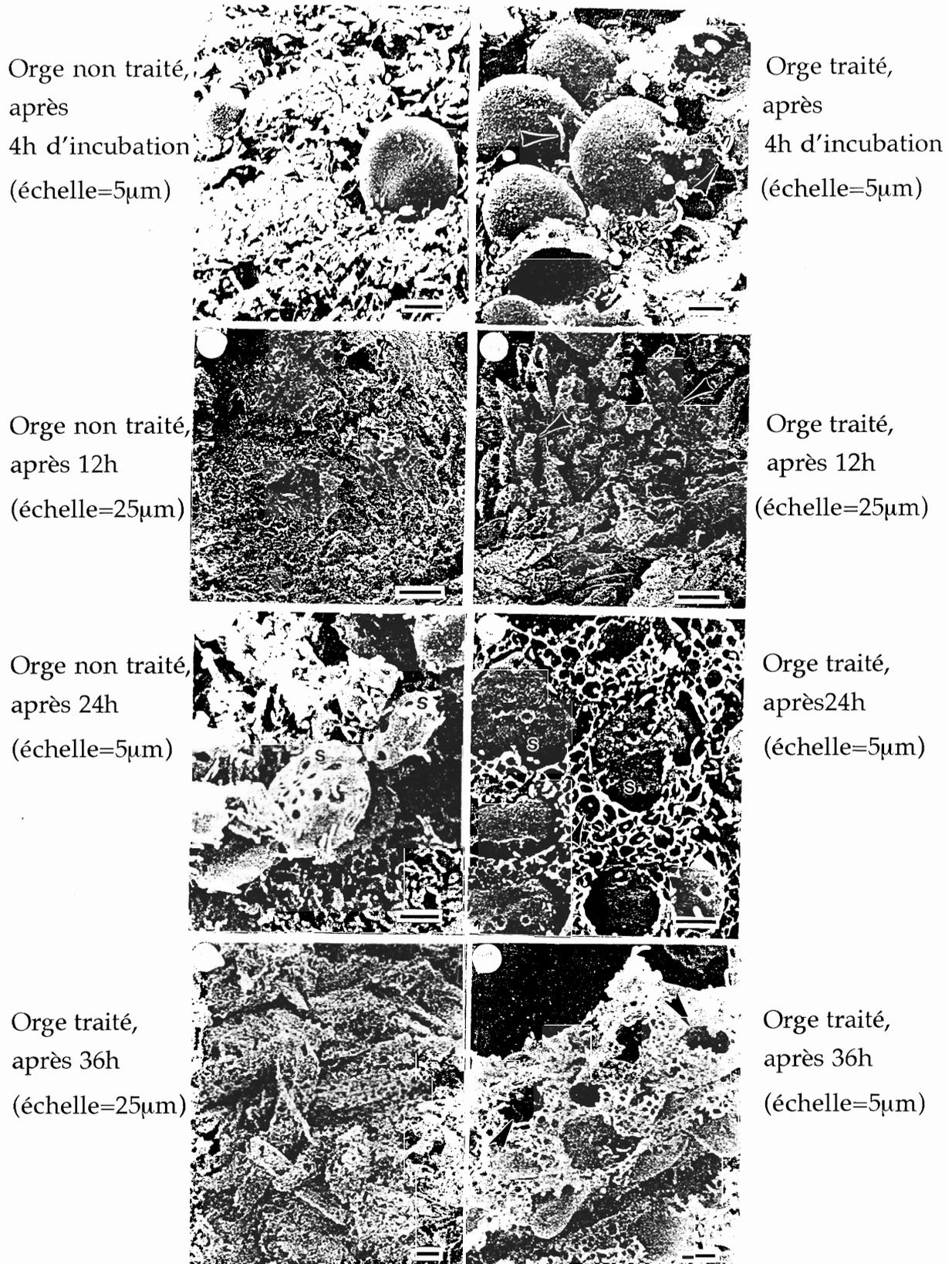


Figure 30: Observation au microscope électronique de la dégradation in vitro d'endosperme d'orge avec ou sans traitement au formaldéhyde (52)

Si on examine parallèlement les courbes de dégradation de l'amidon et de production d'ammoniaque in vitro, on constate un retard de dégradation de l'amidon jusqu'à 24H et une production d'ammoniaque inférieure pour les grains traités, reflet de la moindre dégradation des protéines.

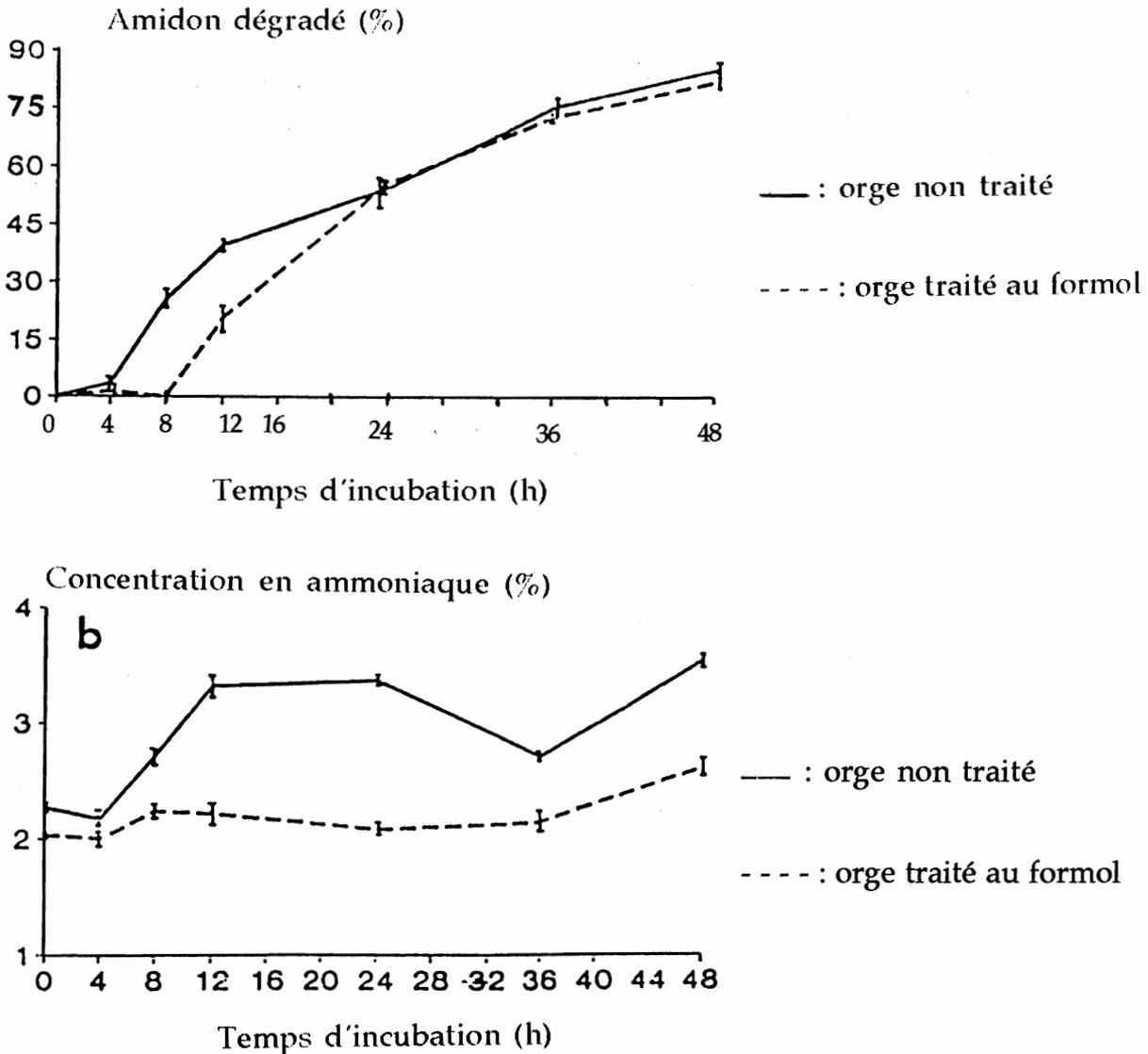


Figure 31: Effet du traitement au formol des grains broyés d'orge sur la dégradation de l'amidon et la production d'ammoniaque in vitro (52)

Ces résultats, également observés par M.E. Ortega-Cerilla et al (1999) (70)(71), confirment le mode d'action du formol (diminution de la dégradation de la matière protéique qui se répercute sur celle de l'amidon), l'effet agissant jusqu'à environ 24h. Donc le traitement au formol provoque en fait un temps de latence pour la digestion ruminale de l'amidon.

Par ailleurs, on a constaté que l'effet du traitement au formol est croissant en fonction de sa concentration et est plus marqué sur le blé que sur le maïs, sans doute parce que les protéines de l'endosperme du blé sont naturellement plus digestibles que celles du maïs et donc davantage affectées par le traitement (61).

	Blé			Maïs		
% formaldéhyde	0	1	5	0	1	5
a (%)	84,2	64,1	32,5	25,7	18,3	12,8
b(%)	16,3	34,4	69,2	80	88,1	91,8
c (%/h)	43	5,5	5,4	3,7	3,6	3,9
DT6 en (%)	98,5	82,5	65,3	56,2	51,5	49,2
Dégradabilité des protéines (%)	80,3	63,8	49,4	52	42	41,1

(Avec: a=fraction soluble; b=fraction progressivement dégradabile; c=vitesse de dégradation de b; DT6=dégradabilité théorique de l'amidon avec un taux de sortie du rumen $k_{pC}=6\%$)

Tableau 13: Influence du traitement au formol sur la digestion ruminale de l'amidon et des protéines de blé et de maïs (61)

En effet, comme le montre le tableau ci-dessus, la diminution de la fraction soluble "a" est très importante pour le blé (supérieure au maïs); de même que la diminution de la vitesse de dégradation "c" de la fraction progressivement dégradabile "b". Et la diminution de dégradation des protéines est aussi beaucoup plus nette pour le blé que le maïs.

REMARQUE:

Les répercussions des traitements chimiques au formol, bien qu'allant toujours dans le même sens, peuvent être différents d'une expérience à l'autre. Cela repose sur les conditions expérimentales (notamment le mode d'incorporation de la substance) et aussi sur les quantités traitées. C'est la raison pour laquelle les expériences in vivo fournissent en général des résultats moins probants que

celles in vitro, car les quantités traitées sont très supérieures, et l'incorporation de formol sans doute moins efficace (61).

Nous pouvons conclure sur les variations liées à l'aliment en rappelant que pour les bovins, un traitement minimum (mécanique = aplatissage ou chimique avec des substances alcalines) est indispensable pour permettre l'accès des microorganismes à l'endosperme, alors que la mastication plus efficace chez les petits ruminants suffit à remplacer ce traitement;

Par ailleurs, concernant les aliments à amidon "rapide", un traitement mécanique plus poussé (broyage, mouture...) visant à diminuer la taille des particules pour augmenter la surface d'accès aux bactéries et améliorer ainsi la vitesse de dégradation est rarement souhaitable.

A l'inverse, il est possible de freiner leur digestion ruminale en retardant la dégradation des protéines de l'endosperme avec des traitements chimiques (formol) sur des grains d'abord traités mécaniquement pour dégrader le péricarpe.

En revanche, pour les aliments à amidon "lent", les traitements mécaniques même importants n'apportent pas toujours les augmentations de digestibilité ruminale espérées du fait de la structure de l'endosperme qui gêne malgré tout cette dégradation (51). En effet cette diminution de taille des particules s'accompagne d'un transit plus rapide, laissant moins de temps aux bactéries pour coloniser et dégrader ces particules alimentaires.

Pour ce type d'aliment, le seul moyen d'augmenter nettement la digestion est le recours à des traitements hydrothermiques, qui, eux, agissent sur la structure de l'endosperme et de l'amidon lui-même et accélèrent l'action des bactéries qui colonisent les particules. Il reste à savoir si ces traitements onéreux sont économiquement rentables.

Nous venons de voir les variations reposant sur l'aliment, tels que le grain lui-même (espèce, variété...), ainsi que les diverses modifications apportées par les traitements que l'on peut appliquer. Tous ces facteurs influent sur la texture et l'organisation des substrats à digérer (essentiellement la structure de l'endosperme dont nous avons vu l'importance majeure) et notamment l'agencement entre la matrice protéique et les granules d'amidon et/ou sur l'accès aux couches intérieures des grains et la surface disponible pour l'attaque

des micro-organismes.

Mais, parallèlement à tous ces facteurs de variations, il faut aussi envisager l'influence de l'environnement de ces aliments, notamment la ration et le niveau d'alimentation.

6- Facteurs de variation extrinsèques:

a- Influence du niveau d'alimentation:

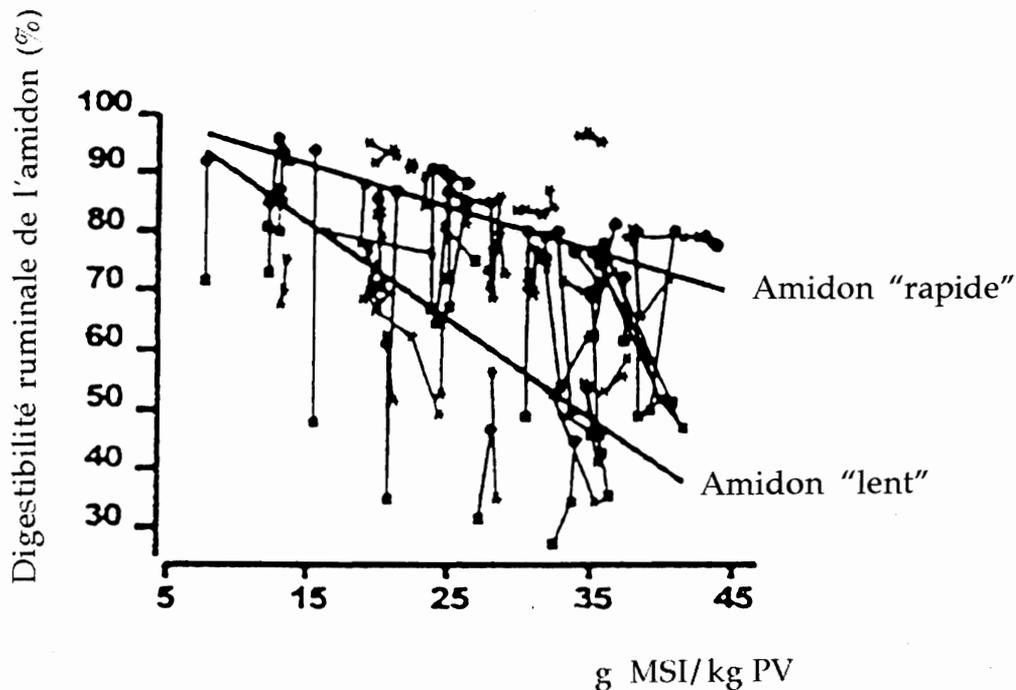


Figure 32: Influence du niveau d'alimentation sur la digestion ruminale de l'amidon (Sauvant et Mertens, synthèse bibliographique, 1997), in(92)

Expérimentalement, on constate que le niveau d'alimentation se répercute sur le temps de séjour des particules dans le rumen ce qui concorde avec les équations de prédiction des taux de sortie des aliments évoqués précédemment.

En effet, aussi bien le modèle de Owens et de Goestch (1986) que le modèle de Sauvant et Archimède (1990)(voir II-A/) montrent, via le coefficient kp_C , que les taux de sortie des particules de concentré (kp_C) au niveau ruminal sont reliés positivement à l'ingestion:

Owens et Gøestsch (1986): $kp_c = 1,3 + 0,61 CI + 4,88 FI - 1,25 (FI)^2$

Sauvant et Archimède (1990): $kp_c = - 0,424 + 1,454 kpf$

avec $FI \leq 1$ puisque exprimé en g de MSI/kgPV^{0,75}, donc $FI^2 \leq FI$.

Il en résulte un temps de séjour amoindri dans le rumen quand le niveau d'ingestion augmente et par conséquent une diminution de la digestion ruminale de l'amidon, en particulier pour les amidons lents comme l'illustre la figure 32 page 66 (74).

b- Influence de la proportion de concentré dans la ration:

Une synthèse de données expérimentales réalisée par Archimède et al. (1993) montre que la digestion ruminale de l'amidon varie aussi en fonction de la teneur de la ration en amidon: on observe que la dégradabilité de l'amidon augmente avec son niveau d'apport au-delà d'un seuil d'environ 50% de concentré dans la ration, soit 30 à 40% d'amidon (90).

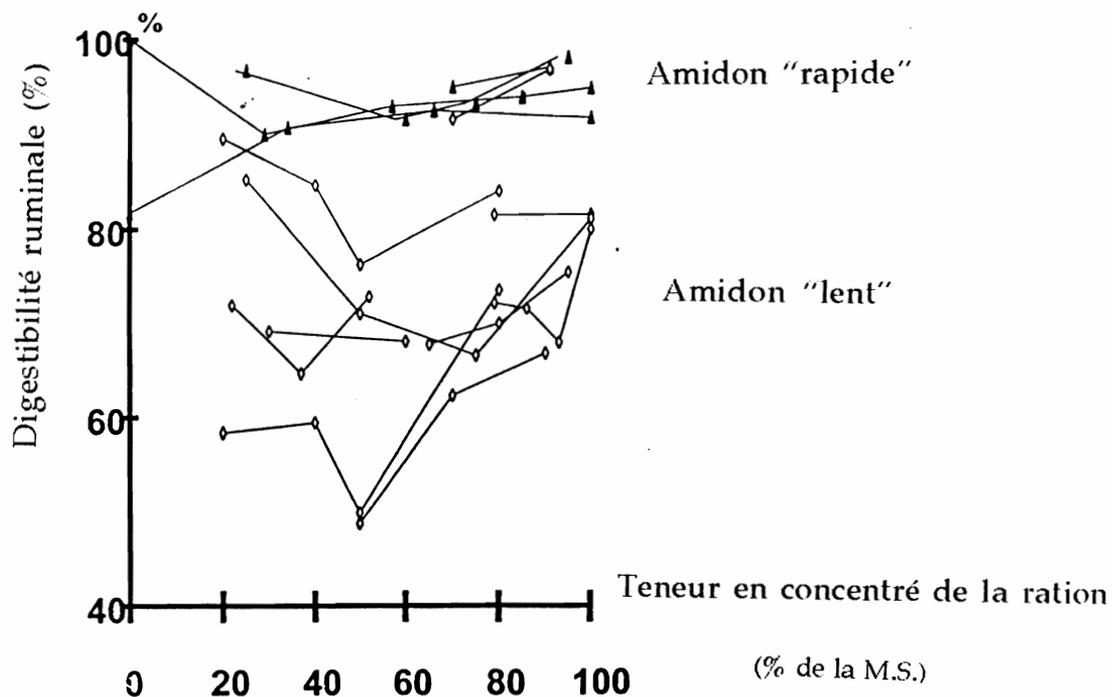


Figure 33: Influence de la teneur en concentré de la ration sur la digestion ruminale de l'amidon (Archimède et al., 1993, in (86))

Ces observations s'expliqueraient par la nécessité d'un certain seuil d'amidon dans la ration pour que la population amylolytique devienne prédominante donc plus active, alors que juste en dessous de ce seuil, elle ne pourrait s'adapter à la quantité à dégrader (90).

c- Rôle de la qualité de la ration de base:

Etant donné que la richesse et l'activité de la micropopulation sont liées à la qualité nutritionnelle des substrats à digérer (du fait de la complémentarité entre les différentes micropopulations), il semble qu'une ration de base bien équilibrée et pas trop pauvre permettra une meilleure digestibilité des différents composants, en particulier des amidons lents.

C'est ce qu'ont révélé les observations d'Archimède (1993).

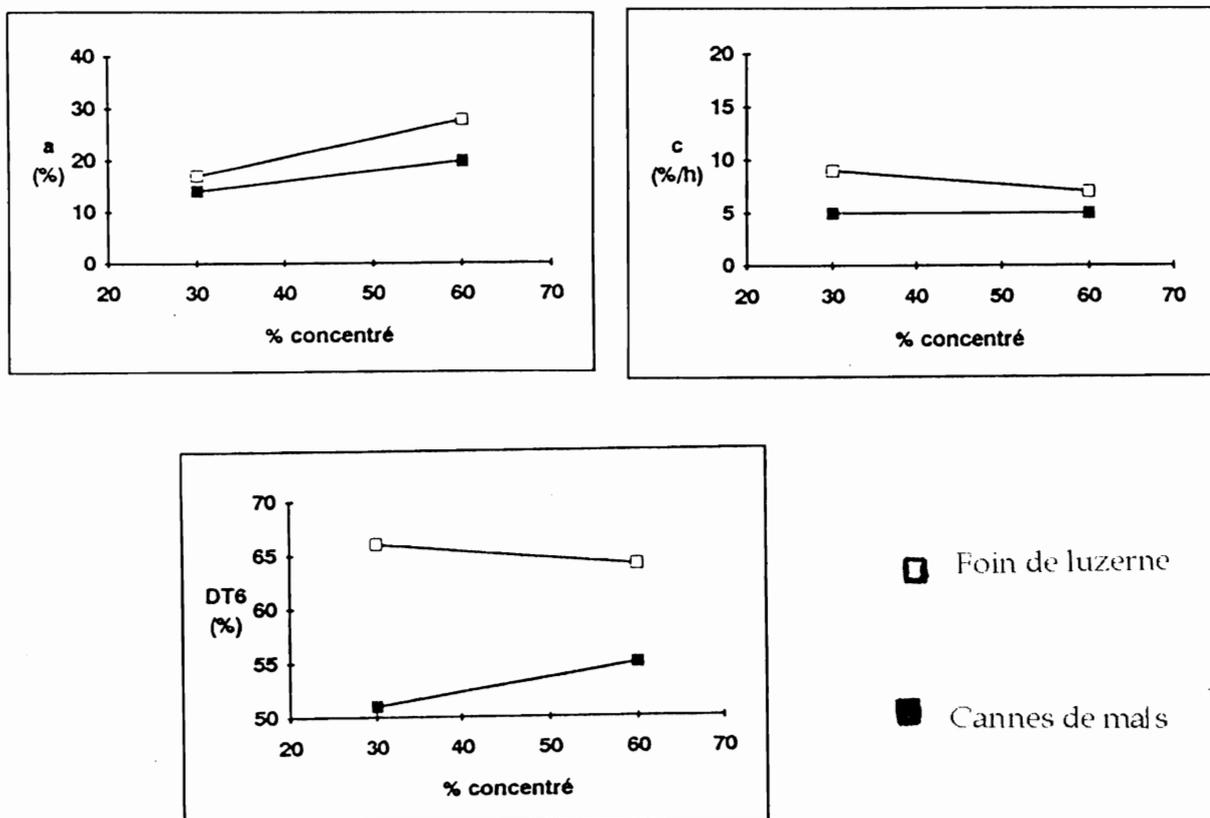


Figure 34: Influence de la ration de base sur les paramètres de dégradation "in sacco" des amidons lents (Archimède, 1993)

On constate que la fraction soluble "a", la vitesse "c" de dégradation de la fraction non soluble, et la dégradabilité théorique DT6 sont toujours supérieures pour les amidons lents quand le concentré est associé à du foin de luzerne, ration de base plus riche que des cannes de maïs.

d- Influence de l'association de plusieurs sources d'amidon:

L'association d'aliments à vitesses de dégradation différentes apporte aux microorganismes le choix entre plusieurs substrats à attaquer, d'où une efficacité supérieure de la dégradation des amidons lents du fait de la moindre spécificité (17). On observe alors une digestibilité ruminale des mélanges supérieure à la moyenne des digestibilités isolées, comme l'illustrent les résultats obtenus par Stock et al. avec du maïs-grain humide associé à du sorgho aplati dans une ration distribuée à des bovins à l'engrais (94).

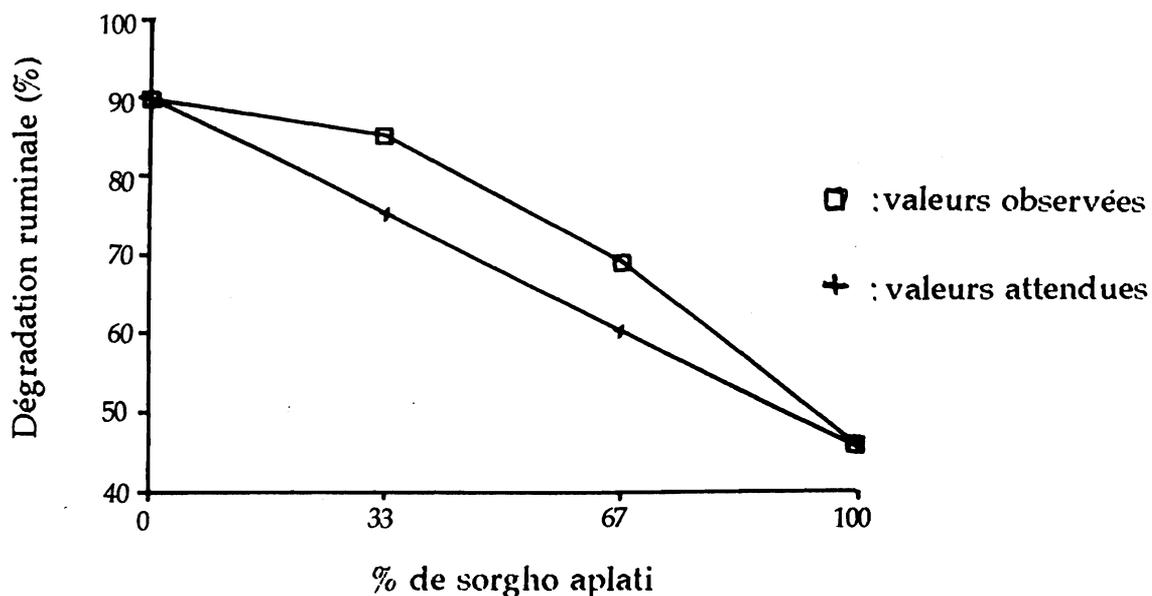


Figure 35: Effet de l'association de maïs-grain humide avec du sorgho aplati sur la digestion ruminale in vivo de l'amidon (94)

e- Autres facteurs de variation:

Le mode de distribution des concentrés influence l'efficacité de la mastication donc l'endommagement des aliments et leur digestibilité ruminale; notamment les animaux qui ont un accès limité aux aliments concentrés les avalent plus rapidement que les autres et leur mastication est réduite, pouvant occasionner une diminution de la digestion ruminale attendue (3).

L'espèce et l'âge de l'animal ingérant l'aliment jouent aussi un rôle:

Les petits ruminants, grâce à leur mastication plus efficace que les bovins, présentent une digestion ruminale des grains supérieure et peuvent même rentabiliser des grains distribués entiers.

Quant aux animaux âgés (notamment les bovins), dont les dents usées diminuent l'efficacité de la mastication, ils ont généralement une digestion ruminale de l'amidon moins efficace que des animaux plus jeunes si le traitement mécanique est léger (40).

III- APPLICATIONS

La problématique est d'obtenir les meilleures performances zootechniques avec un coût de production le plus bas possible, et sans nuire à la santé des animaux.

Le but de cette partie n'est cependant pas de fournir des compositions de rations idéales en fonction des productions visées, mais d'apporter des éléments de réflexion sur l'opportunité d'utiliser tel ou tel aliment, en tenant compte de l'objectif fixé et des contraintes économiques et pratiques.

Nous évoquerons tout d'abord les éléments à prendre en considération afin de mieux comprendre ensuite les choix des aliments et les moyens pour optimiser l'apport de ces aliments concentrés.

A- APPLICATIONS NUTRITIONNELLES

1- Intérêt d'optimiser la digestion ruminale de l'amidon:

Etant donné que la nutrition des ruminants repose essentiellement sur les phénomènes qui se déroulent dans le rumen, il faut favoriser cette digestion ruminale de l'amidon qui fournit l'énergie nécessaire aux synthèses microbiennes qui apportent à l'hôte des vitamines et des protéines de très bonne valeur nutritive, car bien équilibrées en acides aminés essentiels.

D'ailleurs, comme l'a remarqué Sauvart (1997) (91), la digestibilité ruminale de la matière organique (dr.MO) est corrélée positivement à la digestion ruminale de l'amidon (dr. AM):

$$\text{Dr.MO} = 0,395 \text{ dr.AM} + 30,4$$

Une augmentation de la digestibilité ruminale de l'amidon favorisera donc les synthèses de protéines microbiennes, comme le montre la **figure 35** page 73:

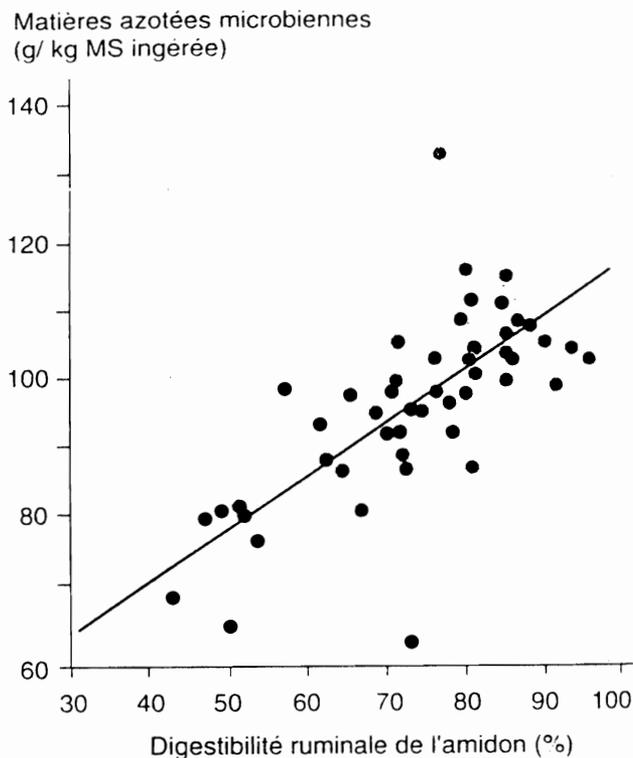


Figure 36: Variations de la protéosynthèse microbienne selon la digestibilité ruminale de l'amidon (91)

Ainsi, plus la digestion ruminale de l'amidon est importante et rapide, moins l'énergie sera limitante dans la synthèse de ces protéines.

On considère que, en moyenne, une ration avec un amidon rapide permettra grâce à son énergie la synthèse de 9,2g/kg de MSI de protéines microbiennes supplémentaires par rapport à un amidon lent (91), ceci vraisemblablement parce que les besoins en énergie doivent être couverts rapidement pour les micro-organismes car leur durée de vie est brève, et cela bien que certaines espèces puissent stocker de l'énergie sous forme de glycogène (31). Toutefois, ces résultats doivent être nuancés car, si la teneur en amidon digestible ruminal est trop élevée, alors les synthèses diminuent, probablement à cause de la baisse de pH néfaste sur certaines bactéries (91).

C'est ce que montre la **figure 37** page 74.

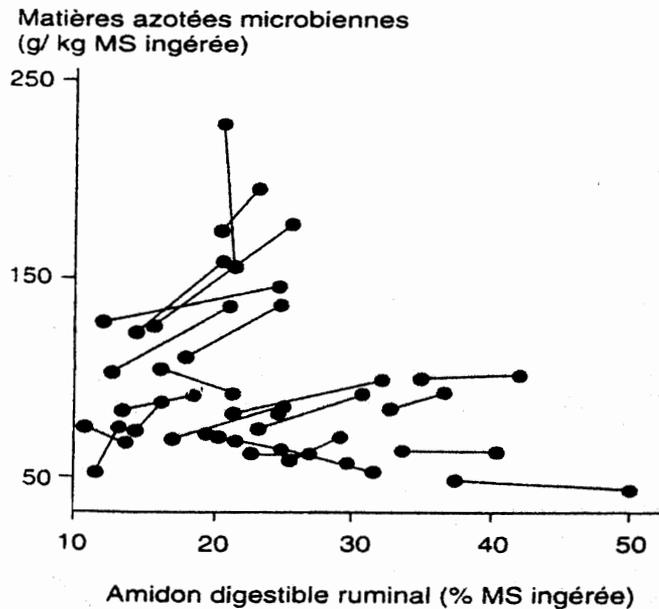
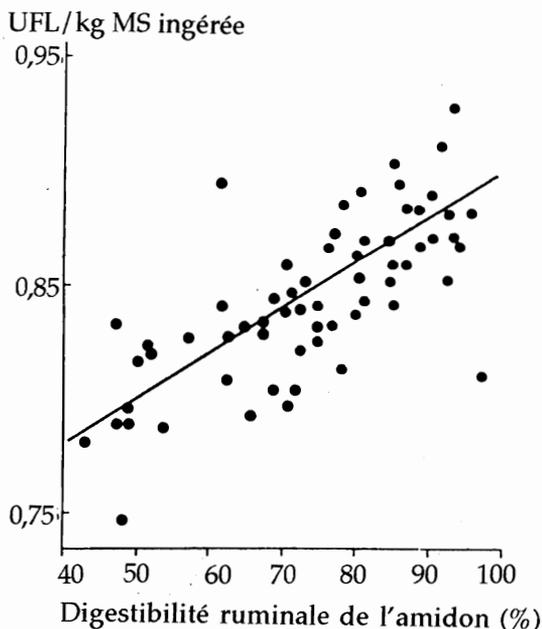


Figure 37: Variations de la protéosynthèse microbienne selon la teneur en amidon digestible ruminal (91)

D'autre part, on constate que l'éventuelle digestion complémentaire de l'amidon dans l'ingestion grêle, dont nous verrons l'intérêt plus loin, est aussi corrélée positivement à sa digestion ruminale, puisque la sécrétion d'enzymes pancréatiques est proportionnelle à la quantité de protéines entrant dans le duodenum (40)(39). Il en va de même pour la valeur énergétique de la ration :



L'équation de régression étant:
 $y = 0,0018 x + 0,712$ (R=0,08)

Figure 38: Relation entre la digestibilité ruminale de l'amidon et la valeur énergétique (en UFL) du régime (91)

Donc, on obtient en moyenne près de 0,02UFL supplémentaires par 10% de digestibilité ruminale d'amidon supplémentaire.

On voit donc ici que pour obtenir un rendement énergétique élevé de l'apport d'aliment concentré il faut une bonne digestion ruminale de son amidon et que les amidons rapides seront à priori plus rentables. Cette tendance est d'autant plus marquée que le niveau de production est élevé, puisque le niveau d'ingestion et par conséquent la vitesse de transit augmentent, et les amidons lents sont plus sensibles que les rapides à la vitesse de transit, comme nous l'avons vu précédemment (voir II-B/).

Mais il faut tenir compte des limites de cette digestion ruminale, au niveau de la santé du ruminant.

2- Limites à la digestion massive de l'amidon dans le rumen:

Le principal inconvénient d'une digestion trop importante de l'amidon dans le rumen est le risque d'apparition de troubles digestifs.

En effet, la digestion ruminale de l'amidon par les bactéries amylolytiques libère de grandes quantités d'acides gras volatils, notamment de l'acide propionique (C3), comme nous l'avons vu dans la première partie (I-C/).

Ces déviations fermentaires au profit de C3 sont d'autant plus marquées que les dégradations sont rapides, diminuant le rapport $(C2+C4)/C3$, notamment quand il est inférieur à 3:

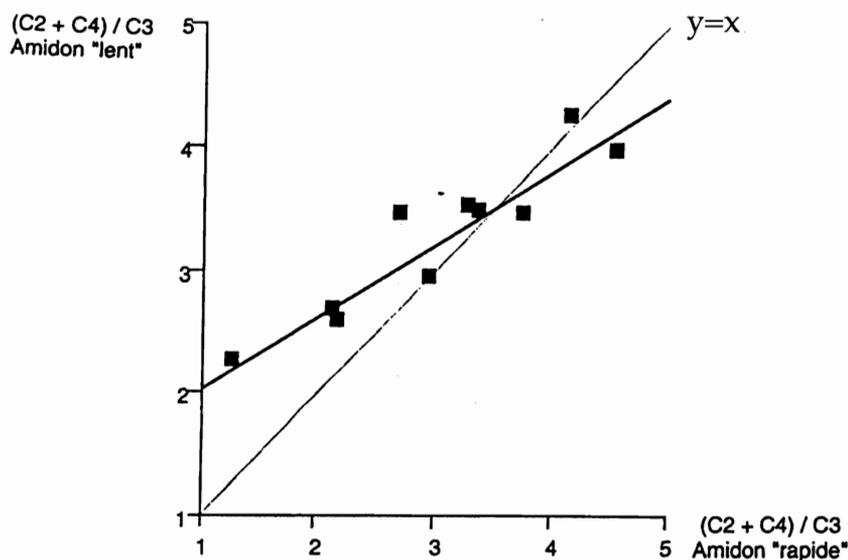


Figure 39: Influence de la nature et de la vitesse de dégradation de l'amidon sur le rapport fermentaire (acétate+butyrate)/propionate dans le rumen (90)

Il en résulte une diminution de pH d'autant plus importante que les fermentations sont rapides, comme le montre le graphique ci-dessous:

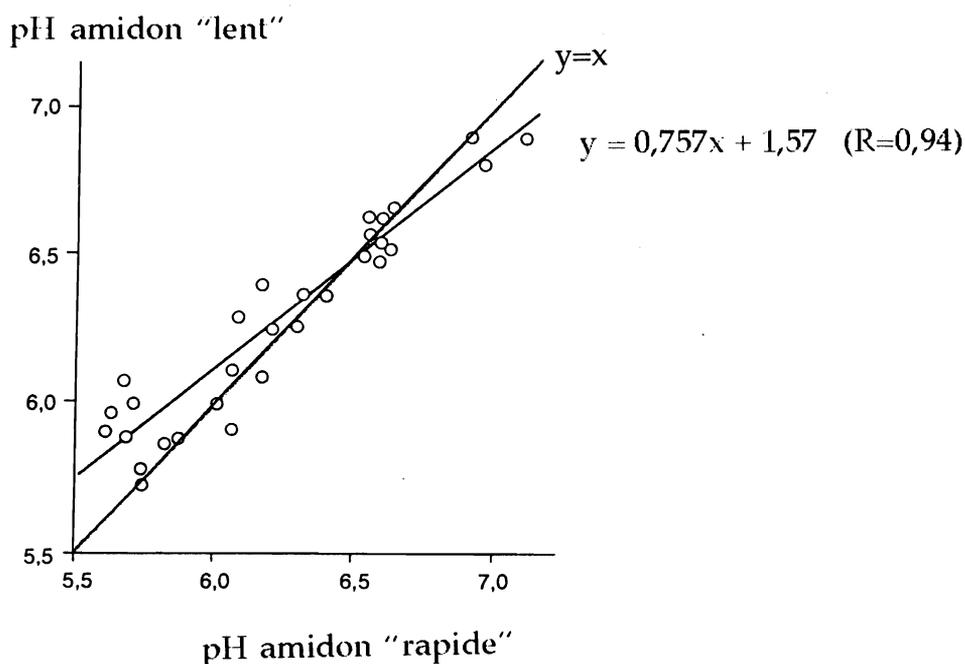


Figure 40: Interaction entre pH ruminal et vitesse de dégradation de l'amidon (91)

On constate que pour des pH physiologiques (autour de 6,5) il n'y a pas d'influence du type d'amidon (on se trouve vers le point d'intersection entre la droite étudiée et la droite d'équation: $y=x$). En revanche en cas d'acidose latente ($\text{pH}<6,2$) on voit que la courbe s'écarte de la droite $y=x$, illustrant l'effet marqué du type d'amidon dans ces cas-là.

De plus la micropopulation amylolytique à croissance rapide se développe au détriment de la flore cellulolytique et renforce l'action inhibitrice de la diminution de pH sur ces microorganismes ($\text{pH}<6,2$); d'où la diminution de la dégradabilité puis de l'ingestion des fibres. Le taux de substitution fourrage/concentré augmente alors, avec une diminution de la salivation, et de la motilité ruminale par défaut de stimuli mécaniques. Tous ces événements s'imbriquent les uns dans les autres pour former un cercle vicieux auto-aggravant. Le rumen se trouve en état d'acidose latente, avec des conséquences néfastes sur la santé de l'animal à moyen terme: météorisation chronique, parakératose de la paroi ruminale, diminution de l'absorption des nutriments, fourbure, abcès hépatiques par diffusion de germes à travers la paroi ruminale

rendue plus perméable (nécrose de papilles), et diminution des performances du fait de la baisse de l'ingestion et du mauvais fonctionnement du réticulo-rumen (69).

Cette tendance au dysfonctionnement ruminal, d'autant plus marquée que la vitesse de dégradation de l'amidon est rapide et que la quantité distribuée est importante, doit toutefois être nuancée car les résultats chiffrés découlent souvent d'expérimentations *in vitro*, donc réalisées en l'absence de protozoaires, qui normalement peuvent limiter ces effets néfastes du fait de leur mode de digestion (séquestration des granules d'amidon)(91). Aussi ces perturbations digestives sont atténuées si la ration de base fournit un milieu ruminal stable avec $C2/C3 > 3,2$, c'est à dire si la ration est suffisamment riche en fibres (91)(47).

REMARQUE: Nous n'envisageons pas ici le cas de l'acidose aiguë (par accumulation d'acide lactique), contre laquelle les protozoaires ne sont d'aucune utilité, et qui résulte d'une ingestion massive de concentrés énergétiques indépendamment de la ration distribuée, parce qu'il s'agit davantage d'une situation accidentelle qui relève plus de la toxicologie que de l'alimentation en tant que telle.

On comprend d'ores et déjà les difficultés qui vont apparaître pour l'établissement de rations d'animaux nécessitant un apport énergétique très élevé, car, si la digestion ruminale de l'amidon est sans limite sur un plan purement quantitatif (tout au moins pour les amidons rapides), on ne peut pas donner aux ruminants des trop grandes quantités d'amidon dégradable dans le rumen à cause des conséquences sur leur santé qui en résulteraient. D'où l'intérêt de prendre en compte le complément de digestion qui peut avoir lieu dans l'intestin grêle.

3- Optimisation de la digestion de l'amidon dans l'intestin grêle:

Etant donné les limites que nous venons de voir concernant la digestion de grandes quantités d'amidon dans le rumen, il peut être intéressant de déplacer cette digestion (tout au moins une partie) vers l'intestin grêle. C'est le but recherché avec les amidons "protégés", dont la digestion ruminale est ralentie au

profit de la digestion intestinale (86).

L'intérêt de cette digestion dans l'intestin grêle découle entre autres d'un rendement énergétique supérieur de 42% environ à celui de la digestion ruminale (72)(47), puisqu'il n'y a pas de pertes d'énergie en chaleur et en gaz (méthane et dihydrogène) (83). Ce rendement est pourtant amoindri par l'utilisation locale d'une partie du glucose libéré par la digestion enzymatique, notamment pour son absorption par les cellules intestinales, et par les microorganismes locaux qui en fermentent une partie avant son absorption (72)(90). Aussi cette digestion intestinale fournit du glucose directement utilisable par l'animal, et de manière étalée dans le temps (puisque l'arrivée des substrats à digérer dans l'intestin est régulière), ce qui peut présenter un intérêt par rapport à l'acide propionique libéré plus brutalement lors de la dégradation ruminale (83)(90).

Les mesures de digestibilité à différents niveaux de l'intestin révèlent qu'il existe réellement une digestion intestinale complémentaire de l'amidon, partagée entre l'intestin grêle et le gros intestin.

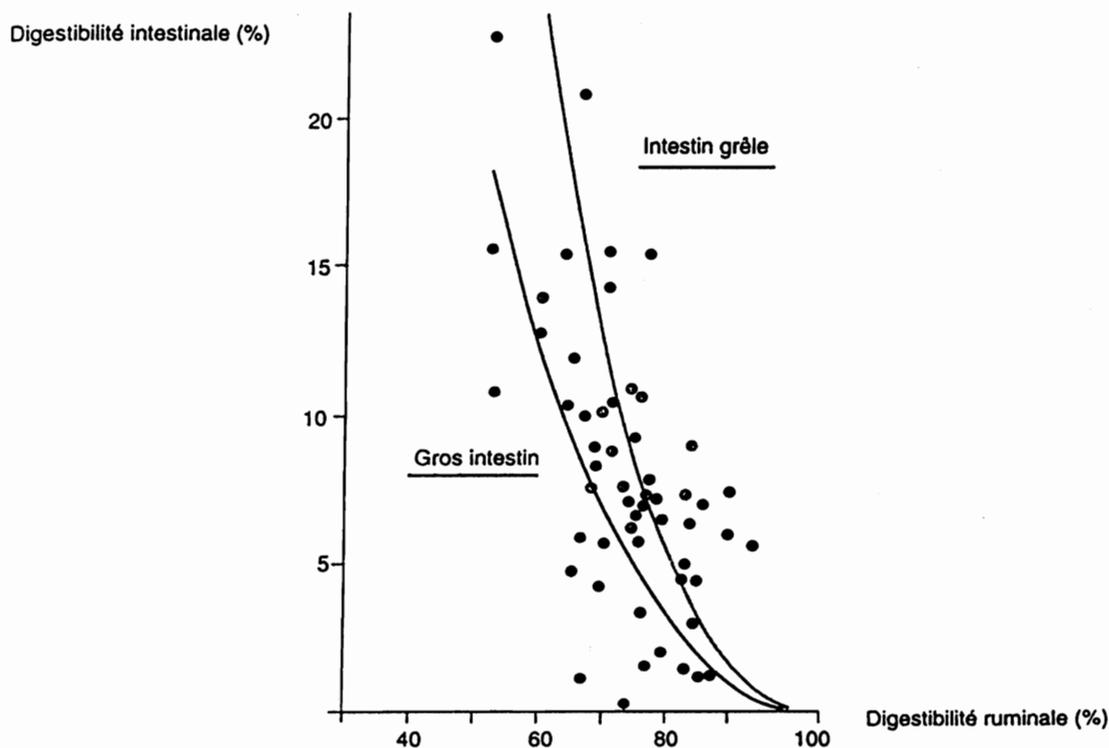


Figure 41: Variations de la partition de l'amidon digéré entre intestin grêle et caecum+colon (90)

Mais à la vue de cette courbe, il semble que la somme des trois digestibilités (rumen, intestin grêle, et gros intestin) reste malgré tout inférieure pour les amidons lents (digestibilité ruminale < 75%) par rapport aux rapides (digestibilité ruminale > 90%). D'ailleurs, les calculs de Nocek et Tamminga (1991) nous permettent de confirmer cette hypothèse (90)(91):

En effet, en partant de l'équation qu'ils ont établie (avec dAIA=digestion intestinale (en %) de l'amidon non dégradé dans le rumen ou "by-pass"=AIA(en %)),

$$dAIA = -0,728 AIA + 87,9 \quad (R^2=0,695)$$

on peut, avec les valeurs de digestibilité préduodénale (DIA) calculées précédemment (II-A/) et en déduisant les valeurs de l'amidon "by-pass" (AIA) par soustraction, déterminer les valeurs suivantes pour les différents aliments:

- La digestibilité intestinale de la fraction "by-pass" (dAIA)(en %);
- La digestibilité totale de l'amidon ingéré (dTot.Am)(en %);
- La digestibilité dans l'intestin grêle de l'amidon "by-pass" (dIG.AIA)(en %), en sachant que la proportion digérée dans le gros intestin représente environ 60% de la quantité digérée dans l'intestin grêle (90) ;
- La fraction de l'amidon ingéré digérée dans l'intestin grêle (dIG.Am)(en %);
- Enfin la fraction de l'amidon ingéré digérée dans le rumen et l'intestin grêle (dR.IG.Am)(en %).

Ces valeurs moyennes (regroupées dans le **tableau 14** page 80) montrent que la digestion dans l'intestin grêle compense, mais pas totalement, le défaut de digestibilité ruminale des amidons lents puisque la somme des digestibilités ruminale et dans l'intestin grêle reste en déficit de 10% environ par rapport aux amidons rapides.

REMARQUE: Certes, si l'on prend en compte la fraction digérée dans le gros intestin, la différence s'amenuise, mais les chiffres alors obtenus ne reflètent pas le vrai rendement pour l'hôte puisque les AGV issus des fermentations dans le gros intestin sont très peu absorbés (30); par ailleurs les synthèses de protéines microbiennes sont faibles à ce niveau, et les quelques protéines synthétisées sont très peu absorbées (69)(83). Enfin ces fermentations dans le gros intestin, qui ne

Aliment	Digestion ruminale de l'amidon (%)	Amidon by pass (%)	Digestion intestinale (Par rapport à by pass) (%)	Digestion intestin grêle du by pass (%)	Digestion globale de l'amidon (% ingéré)	Digestion dans intestin grêle (par rapport à ingéré) (% ingéré)	Digestion rumen et intestin grêle (% ingéré)
Avoine	93,2	6,8	82,9	51,8	98,8	3,5	96,7
Blé	90,6	9,4	81	50,6	98,2	4,8	95,4
Orge	90,9	9,1	81,3	50,8	98,3	4,6	95,5
Pois	86,3	13,7	77,9	48,7	97	6,7	93
Maïs	73,6	26,4	68,7	42,9	91,7	11,32	84,9
Pomme de terre	74,2	25,8	69,1	43,2	92	11,14	85,3
Sorgho	71	29	66,8	41,7	90,4	12,1	83,1

Tableau 14: Digestibilité moyenne de l'amidon des principaux aliments dans les différents segments du tube digestif des ruminants

présentent pas un grand intérêt pour l'hôte, peuvent engendrer des effets néfastes sur la santé à cause de l'accumulation d'AGV acidifiant le contenu de l'organe (83).

De ce fait, aussi bien pour améliorer le rendement énergétique que pour éviter des troubles au niveau du gros intestin, il faut optimiser la digestion de l'amidon dans l'intestin grêle. Pour cela, étant donné que le temps de séjour des aliments est généralement faible dans l'intestin grêle (et ce d'autant plus que le niveau alimentaire est élevé), pour favoriser cette digestion il faut une taille réduite des particules, voire des traitements hydrothermiques (72). En fait on s'aperçoit que les traitements qui augmentent la digestibilité des amidons dans l'intestin grêle sont les mêmes que ceux qui améliorent leur digestibilité ruminale (30): elle est favorisée par un meilleur accès des enzymes aux granules d'amidon.

REMARQUE: La pulvérisation de formol est un cas particulier: ce traitement freine la dégradation ruminale sans pénaliser la digestion intestinale puisque les liaisons chimiques responsables de son action de tannin sont détruites dans la caillette (27).

Compte tenu de tous ces éléments, il pourrait paraître intéressant de déplacer le plus possible la digestion de l'amidon vers l'intestin grêle puisque cela diminuerait les risques de dysfonctionnement ruminal tout en ayant un rendement énergétique meilleur; d'ailleurs certains auteurs l'ont envisagé (83). Mais il ne faut pas oublier que le grand intérêt de la digestion ruminale de l'amidon est de fournir l'énergie nécessaire aux synthèses microbiennes très bénéfiques pour l'hôte; par ailleurs, même si le rendement énergétique de la digestion intestinale est supérieur (de 42%) à celui du rumen, il faudrait une digestibilité intestinale égale à environ 7/10^e de celle du rumen pour que le rendement réel soit équivalent à celui de la digestion ruminale (puisque 1/1,42 est environ égal à 0,70) (72). Or ce n'est pas le cas en général, puisque d'après les valeurs du tableau 14 le rapport serait plutôt de 0,5 à 0,6 environ. Ceci est d'ailleurs en accord avec les données vues précédemment (III-A/1/). C'est pourquoi nous pensons qu'il vaut mieux favoriser en première intention la digestion ruminale de l'amidon et réserver la possibilité de la digestion dans l'intestin grêle en complément pour les rations très riches en amidon.

B- CONSEQUENCES METABOLIQUES

1- Engraissement des animaux

L'augmentation de la masse musculaire et de l'état d'engraissement dépendent surtout du niveau énergétique de la ration. Ainsi, à partir du moment où les apports énergétiques sont excédentaires par rapport aux besoins d'entretien avec un bon équilibre entre apports énergétiques et azotés, on note peu de différences entre les sources d'amidon; mais peu d'études ont été publiées à ce jour (91).

Toutefois, concernant la qualité des carcasses, Pethick et al. (1997) ont révélé que l'absorption digestive de glucose, c'est-à-dire la digestion intestinale de l'amidon, est favorable au dépôt intramusculaire de matière grasse ("marbré" et "persillé") (83), ce qui donnerait plutôt l'avantage aux amidons lents, d'autant plus qu'ils présentent moins de risques sanitaires.

2- Production laitière

Les conséquences sont en revanche beaucoup plus nombreuses concernant la production laitière. Nous verrons successivement la production laitière brute et la composition du lait.

a) Production laitière brute:

La production de lait est directement dépendante de la sécrétion de lactose au niveau des acini mammaires, celui-ci créant un appel d'eau par pouvoir osmotique (45 grammes de lactose permettent la constitution d'un litre de lait environ). Ce lactose est lui-même synthétisé dans les lactocytes à partir du glucose prélevé dans le sang par la mamelle (4). D'après Huntington (1994), le glucose des vaches laitières provient à 28% de son absorption directe par les intestins, à 67% de la néoglucogénèse à partir des produits issus des fermentations ruminales (C3 étant le principal précurseur) et des acides aminés glucoformateurs, et à 5% d'autres sources tels que le glycérol libéré par la lipomobilisation (39).

Une synthèse bibliographique réalisée par Sauvant (1997) montre que le choix du type d'amidon a peu d'influence sur la quantité de lait produite (91). En fait la

production de lait est davantage corrélée à la quantité de matière sèche ingérée (91), c'est-à-dire au bon fonctionnement du rumen.

b) Taux protéique (TP)

La plupart des protéines du lait (c'est-à-dire autres que les immunoglobulines et les albumines) sont synthétisées dans la mamelle à partir des acides aminés circulants, issus en majorité de l'absorption digestive, le restant provenant des réserves corporelles. Or les amidons "rapides" permettent une synthèse de protéines microbiennes plus importante que les amidons "lents", celles-ci possédant en outre un équilibre en acides aminés proche de la caséine; d'autre part, l'acide propionique libéré massivement au cours de leur dégradation ruminale a un effet insulinothrompe marqué, orientant les acides aminés circulants vers les synthèses protéiques (notamment dans la mamelle) plutôt que vers la néoglucogénèse (4)(19)(12)(90)(23).

Il en résulte un taux protéique supérieur et notamment un rendement fromager meilleur (davantage de caséine) avec un amidon rapide par rapport à un amidon lent; dans une synthèse bibliographique, Sauvart (1997) a observé une différence moyenne du taux protéique de 0,5g/kg de lait en faveur des amidons rapides (91).

c) taux butyreux (TB)

Les acides gras des triglycérides du lait peuvent être synthétisés à partir des acides acétique (C2) et butyrique (C4) issus des fermentations ruminales (précurseurs des acides gras saturés courts et moyens), ou bien provenir de la lipolyse (libérant des acides gras saturés et longs), ou encore de la digestion intestinale des matières grasses alimentaires. On comprend alors l'influence du type d'amidon sur le taux butyreux. En effet, les amidons "rapides", libérant une grande quantité d'acide propionique (C3) en peu de temps, défavorisent la synthèse des matières grasses du lait pour deux raisons: la première est digestive et est liée à la diminution des teneurs ruminales en C2 et C4 associée à la production rapide de C3 et à la baisse du pH ruminal concomitante. La deuxième raison est métabolique: l'acide propionique absorbé brutalement et massivement ne pourra pas être totalement pris en charge pour la

néoglucogénèse, d'où la stimulation de la sécrétion d'insuline (car C3 a un effet plus insulino-trope que le glucose); cela se traduit par une diminution de la lipolyse et une augmentation de la lipogénèse. Pour ces deux raisons, avec un amidon "rapide" il y a donc moins d'acides gras saturés disponibles, d'origine alimentaire ou corporelle, pour la synthèse des triglycérides du lait (19)(91)(23).

Nous constatons ainsi que les amidons lents sont plus favorables au taux butyreux que les amidons rapides. Dans une synthèse de données expérimentales, Sauvante (1997) a relevé un écart moyen de taux butyreux de 1,2 g/kg de lait en faveur de l'amidon lent (91). Mais cette influence du type d'amidon est surtout marquée quand le taux butyreux est bas, comme le montre la figure ci-dessous.

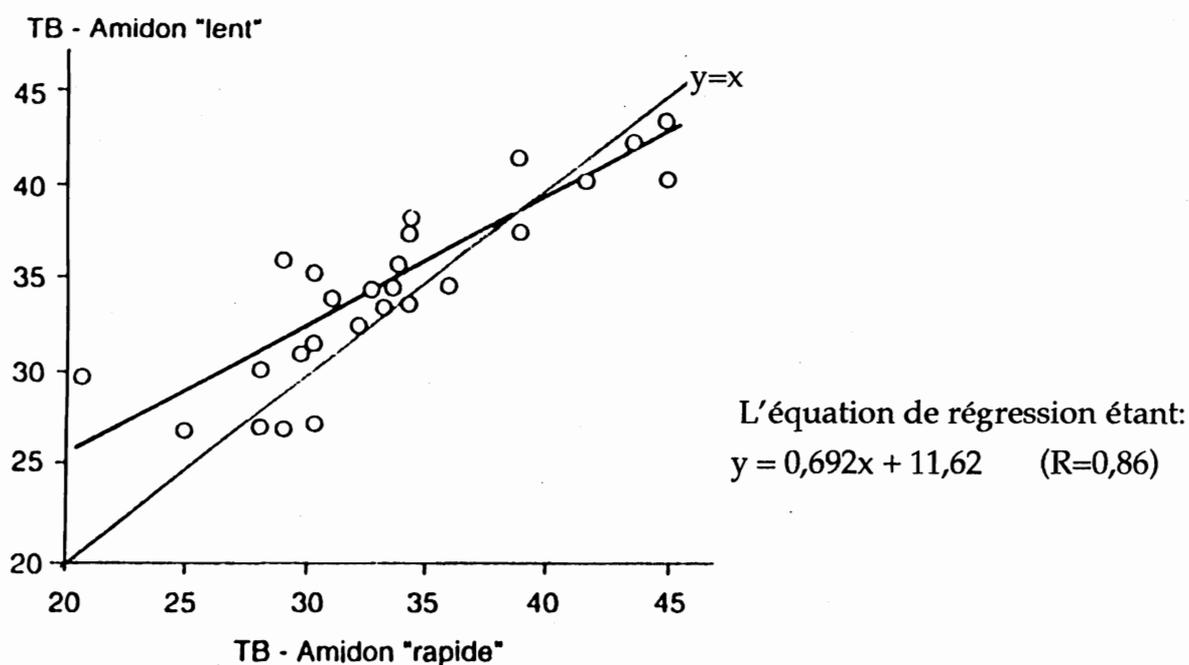


Figure 42: Interaction entre taux butyreux du lait et vitesse de dégradation de l'amidon (91)

On voit que si l'on s'éloigne de 40 g/l (point d'intersection entre la courbe étudiée et la droite d'équation: $y=x$), l'écart entre les taux butyreux obtenus avec l'amidon lent et rapide se creuse.

En fait, même pour un aliment donné, tout traitement qui augmente la vitesse de dégradation ruminale (notamment le broyage) provoque une diminution du taux butyreux (19).

C- APPLICATIONS PRATIQUES

La problématique est d'obtenir une digestion de l'amidon optimale, puisque l'on recherche une optimisation de la densité énergétique de la ration, mais sans répercussions néfastes sur la santé du ruminant. En fait cela revient à gérer au mieux la partition de la digestion de l'amidon. Nous verrons successivement les critères de choix de la source d'amidon, les contraintes concernant l'association des concentrés énergétiques et azotés, et enfin le mode de distribution des concentrés énergétiques. Nous évoquerons surtout les applications sur les vaches laitières, puisque c'est le type de production qui est le plus sensible à ces éléments et qui a fait l'objet de plus d'études comparatives.

1- Choix de la source d'amidon:

a) cas général des vaches laitières:

Nous avons vu que la quantité de lait produite est peu dépendante du type d'amidon distribué, mais davantage liée à la quantité de matière sèche ingérée (MSI), donc au bon fonctionnement du rumen. En revanche les taux protéique et butyreux sont plus influencés par la source d'amidon: en effet, plus la dégradation ruminale de l'amidon est importante, plus le rendement énergétique global de la ration est élevé, ce qui favorise le taux protéique. En revanche une dégradation ruminale faible favorise plutôt le taux butyreux, les effets étant d'autant plus marqués que le niveau d'apport en concentré est élevé.

Or le prix du lait est indexé actuellement sur le taux protéique (TP), et même sur le rapport TP/TB (19). Un autre facteur, d'apparition plus récente et qui pourrait prendre de l'importance dans les années à venir, concerne la qualité des matières grasses du lait, car les acides gras longs et saturés, hypercholestérolémiant, favorisent les maladies cardio-vasculaires du consommateur. Cela incite les industries agro-alimentaires à rechercher de plus en plus du lait permettant d'obtenir du beurre pauvre en acides gras saturés et plutôt riche en acides gras insaturés qui présente en outre une meilleure "tartinabilité", facteur également de plus en plus pris en compte (19).

Par conséquent, si pour des apports en concentrés inférieurs à 30% environ de la matière sèche ingérée le type d'aliment n'a pas d'influence significative (48)(47)(14), pour des niveaux d'apport supérieurs l'optimisation de la dégradation ruminale semble plus intéressante pour le type de production laitière recherché aujourd'hui; ceci d'autant plus que l'effet insulino-trope de l'acide propionique limite l'amaigrissement des vaches dans les semaines qui suivent le vêlage, ce qui présente aussi un avantage non négligeable (90). Pour cela, nous pouvons donc soit distribuer un aliment à dégradation "naturellement" rapide (tel que l'orge, le blé ou l'avoine), soit un aliment à dégradation normalement lente (tel que le maïs ou le sorgho), et "accélérée" par un traitement approprié.

Le choix de la matière première repose sur plusieurs critères:

- Un aliment à dégradation "naturellement" rapide (orge, blé, avoine) présente l'avantage de ne nécessiter qu'un traitement léger (comme l'aplatissage, pour rompre le péricarpe) ou même aucun traitement pour l'avoine (47). L'avoine est cependant peu utilisée pour l'alimentation des ruminants.
- Une source d'amidon lent (maïs, sorgho) nécessite par contre un traitement beaucoup plus poussé pour présenter une dégradabilité voisine de celle des amidons "naturellement" rapides. Les seuls traitements qui portent la dégradabilité ruminale au niveau des amidons "rapides" sont les traitements hydrothermiques, mais ils sont généralement coûteux et sont encore peu utilisés actuellement (67)(39)(36). En revanche il nous semble qu'un traitement mécanique poussé (broyage fin, voire mouture) en particulier à partir de variétés à faible vitrosité peut être intéressant; en effet, si ce traitement ne permet pas d'obtenir un niveau optimal de dégradabilité ruminale (à cause du temps de séjour qui diminue en raison de la petite taille des particules), il l'améliore nettement et assure aussi une digestion intestinale plus importante du fait, précisément, de la faible taille des particules. La digestion totale dans le tube digestif est alors semblable à celle d'un amidon rapide (50)(30). Ainsi l'utilisation de ce type d'aliment semble intéressante puisque la partition de la digestion de l'amidon entre le rumen et l'intestin grêle est mieux équilibrée qu'avec les amidons rapides, avec moins de risques sanitaires. Les résultats expérimentaux obtenus par Lykos et al. (1997) avec du maïs-grain humide broyé donné à des vaches laitières sont d'ailleurs assez probants (50).

Aussi nous pensons que ce type d'aliment présente une certaine souplesse

d'utilisation, en modulant le traitement en fonction des besoins avec un broyage plus ou moins fin puisqu'il est généralement réalisé sur l'exploitation. Nous pensons notamment à l'évolution des besoins des vaches en lactation, pour lesquelles un amidon rapide n'est pas forcément préférable pendant la phase descendante de la lactation, puisqu'il favorise l'engraissement: grâce à cette souplesse d'utilisation, on pourrait mieux adapter le niveau de traitement aux besoins des animaux.

En revanche la présentation en particules très fines présente deux inconvénients: du fait de la poussière qui s'en dégage, elle peut diminuer un peu l'ingestion et encrasser le matériel.

Au vu de toutes ces considérations nous constatons que le choix de la matière première source d'amidon n'est pas simple, d'autant plus qu'il est tributaire aussi des facteurs économiques (prix des différentes céréales, productions de l'exploitation...)

Conclusion

Même si les amidons "rapides" sont plutôt favorables au type de production laitière recherché actuellement, il faut cependant garder à l'esprit l'effet acidogène plus marqué de ces derniers par rapport aux amidons lents, notamment lorsque la ration de base est déjà à tendance propionique (c'est-à-dire quand le rapport molaire $(C2+C4)/C3$ est inférieur à 3) (12)(90), ou quand l'apport de concentrés est élevé (supérieur à 50% de la matière sèche de la ration)(47)(10). Dans ces cas-là une source d'amidon "lent" présente moins de risques d'acidose latente, mais peut s'avérer insatisfaisante pour la couverture des besoins puisque la densité énergétique de la ration sera inférieure. Il faut alors chercher des solutions permettant la meilleure partition possible de la digestion de l'amidon entre le rumen et l'intestin grêle, pour couvrir les besoins sans nuire à la santé de l'animal, ou adapter le mode de distribution.

b) Adaptation des traitements pour les rations très riches en concentrés:

Quand l'apport de concentrés énergétiques dépasse nettement 50% de la matière sèche de la ration, il est nécessaire de gérer la partition de la digestion de

l'amidon ou de limiter la baisse du pH ruminal, afin d'éviter des dysfonctionnements du rumen qui s'accompagneraient à terme d'une diminution de l'ingestion puis des productions.

Traitement des grains par la soude:

Cela permet de distribuer des grains entiers (favorisant ainsi la mastication donc la salivation) sans gaspillage puisque la soude fragilise le péricarpe donc permet leur digestion ruminale comme nous l'avons vu précédemment (II-B/). Et, du fait de la salivation accrue le pH se maintient plus élevé qu'avec des grains broyés, pour une digestibilité presque équivalente (58)(46).

C'est ce qu'a mis en évidence Orskov (1986) sur des vaches laitières ingérant jusqu'à 80% d'orge-grain, où le taux butyreux maintenu relativement élevé et les teneurs ruminales en C2 et C3 témoignent du bon fonctionnement du rumen malgré le taux élevé de concentré dans la ration.

Fourrage/Orge	Traitement	A. acétique (% molaire)	A. propionique (% molaire)	Taux butyreux en g/kg	Lait à 4% MG en kg/j
30/70	aplatis	56	31	33	14,7
30/70	soude	64	18	39	15,5
20/80	aplatis	49,5	37,8	28,4	13,0
20/80	soude	61,4	19,0	38,5	14,6

Tableau 15: Effet du traitement de l'orge par la soude sur les performances laitières (69)

Ce type de traitement, relativement satisfaisant sur un plan nutritionnel et métabolique, présente cependant des inconvénients majeurs sur le plan pratique: les grains traités ont tendance à se prendre en masse, formant des amas peu appétibles, et par ailleurs la manipulation de la soude est dangereuse.

Traitement des grains broyés avec du formol

Il permet d'obtenir un temps de latence avant la fermentation de l'amidon. Ceci permet d'étaler la dégradation dans le temps et d'éviter une production trop brutale de C3 avec une diminution du pH ruminal; il assure ainsi une meilleure digestion ruminale des fourrages. On retrouverait des conditions équivalentes à un apport d'aliments étalé dans le temps, mais peu d'études à ce jour ont été

consacrées aux productions permises par ce type de traitement. On peut supposer toutefois que les résultats seraient assez intéressants puisque la digestion de "rattrapage" dans l'intestin grêle devrait se faire dans de bonnes conditions, étant donné que l'aliment broyé facilite l'action des enzymes pancréatiques, et que les liaisons entre le formol et les protéines de l'endosperme sont détruites par l'acidité de la caillette, annulant son rôle de tannin (27).

Incorporation de substances tampon:

Du bicarbonate de sodium ou de l'oxyde de magnésium distribués à raison de 1 à 2% de la matière sèche ingérée pourraient remplacer le défaut de salivation en servant de tampon, tout en augmentant la quantité d'eau bue.

Association de plusieurs sources d'amidon:

Nous avons vu (II-B/) que l'association de sources d'amidon à vitesses de dégradation différentes permet une amélioration de la digestibilité ruminale de l'amidon lent. De ce fait, pour des apports importants de concentrés, cela permet une digestibilité ruminale importante, mais avec moins d'effets néfastes que si l'amidon rapide était distribué seul. Cela se traduit par une amélioration des performances, comme le montrent les résultats des expériences menées par Stock et al. sur des boeufs à l'engrais recevant une ration avec 80% de concentrés représentés par un mélange de maïs-grain humide et de sorgho aplati (93). Le meilleur rendement (gain de poids/ quantité d'aliments ingérés) est ici observé avec environ 30% d'amidon lent et 70% d'amidon rapide, comme l'illustre la **figure 43** page 90.

Axe et al. (1987) ont fait les mêmes constatations avec une ration contenant 80% de céréales (du blé aplati associé à du sorgho-grain humide) distribuée à des bovins à l'engraissement: les meilleures performances ont été observées avec environ deux tiers de blé (source d'amidon rapide) pour un tiers de sorgho (source d'amidon lent) (2).

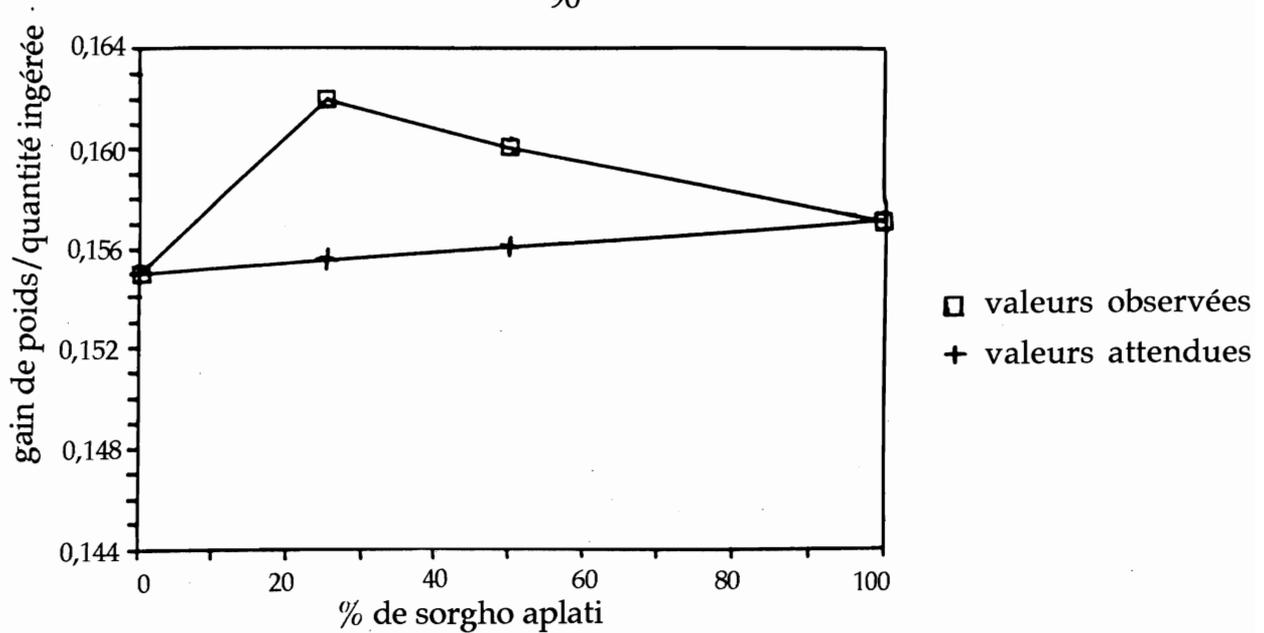


Figure 43: Effet de l'association de maïs-grain humide avec du sorgho aplati sur le rapport "gain de poids/ quantité ingérée" de boeufs à l'engrais (94)

L'association raisonnée d'amidons lents et rapides semble donc constituer une bonne méthode pour limiter les risques sanitaires quand de hautes teneurs en concentrés sont distribuées tout en améliorant les performances.

Conclusion sur le choix des aliments:

En résumé, lorsque l'apport de concentrés énergétiques n'excède pas un tiers de la matière sèche de la ration, le type d'aliment a peu d'influence sur les performances zootechniques et le risque de perturbations ruminales est minime, à condition de respecter les règles élémentaires de distribution que nous verrons ultérieurement. Le choix sera donc guidé essentiellement par les aspects économiques concernant la matière première.

En revanche, pour des apports plus importants (entre 30 et 50% environ), qui sont généralement associés à un haut niveau d'ingestion, donc un transit accéléré, les amidons lents risquent de ne pas apporter une densité énergétique suffisante; ainsi un amidon rapide est préférable, mais avec des précautions concernant la distribution. Enfin pour des apports très importants (supérieurs à 50%) il faut impérativement utiliser des méthodes particulières. En conclusion, on peut insister sur la délicatesse du problème des rations riches en énergie, où il

faut un apport important mais pas trop rapide de produits de fermentation.

2- Association des concentrés énergétiques et azotés:

a) Rappels sur la digestion ruminale de la matière azotée:

Selon leur nature les matières azotées suivent différentes voies dans le rumen (24). L'azote non protéique (urée principalement) est dégradé très rapidement en ammoniac. Une fraction variable des protéines est dégradée plus ou moins rapidement par les microorganismes, essentiellement les bactéries protéolytiques, libérant des peptides et de l'ammoniac. Une partie de l'ammoniac libéré par ces deux types de sources azotées et les peptides sont ensuite incorporés dans de nouvelles protéines microbiennes au cours de la multiplication de la microflore; celles-ci seront évacuées vers l'intestin grêle. Une partie de cet ammoniac libéré peut aussi être absorbé par la muqueuse ruminale, s'il n'est pas rapidement utilisé pour les synthèses microbiennes.

D'autres protéines ne seront pas dégradées dans le rumen et gagneront l'intestin grêle.

Nous avons vu précédemment que les protéines microbiennes présentent l'avantage d'être de haute valeur nutritive pour le ruminant, d'où l'intérêt d'optimiser leur synthèse. Or, pour se multiplier, les microorganismes ont besoin de l'énergie fournie par les dégradations des glucides dans le rumen, comme nous l'avons vu précédemment. Nous allons donc voir les contraintes que cela impose au niveau de l'association des sources d'énergie et d'azote.

b) Association des apports d'énergie et d'azote:

En fait, ce n'est pas le moment de l'ingestion qui est important, mais la disponibilité dans le rumen (99). Ainsi, si on prend l'hypothèse d'un apport important de source d'énergie rapide (par exemple d'amidon rapide tels que le blé ou l'orge) et si parallèlement, l'azote est libéré lentement, alors on aboutit à un "découplage des fermentations", c'est-à-dire que l'énergie libérée ne peut servir à alimenter les synthèses microbiennes à cause du manque d'azote disponible, d'où la diminution de ces synthèses (42).

Il en résulte à terme un défaut de micropopulation par rapport à l'énergie potentiellement apportée, avec une diminution de l'efficacité digestive.

De même, l'utilisation d'une source d'énergie plus lente associée à des sources azotées très rapidement dégradables peut aussi engendrer des perturbations: si l'énergie n'est pas suffisamment disponible au moment où l'ammoniaque est libéré massivement, ce dernier est absorbé par la paroi ruminale (40). Cet ammoniaque est ensuite transformé en urée dans le foie, puis peut regagner le rumen (42) via la salive ou par diffusion à travers la paroi ruminale (donc il peut être réutilisé), mais il est aussi éliminé par l'urine et le lait (représentant un gaspillage) et la sollicitation importante du foie pour synthétiser l'urée peut être néfaste pour le ruminant; aussi une teneur trop élevée d'urée dans le lait (>300mg/l) peut perturber les fabrications fromagères (4).

On comprend ainsi l'intérêt d'associer les sources d'énergie rapide avec des sources d'azote rapides, et les lentes avec des lentes.

Le **tableau 16** ci-dessous rappelle les principales sources azotées et énergétiques et leurs vitesses de dégradation ruminale respectives.

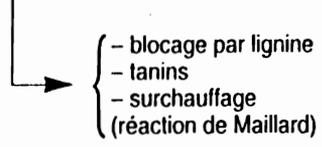
Protides		Glucides	
azote non protéique	vitesse de dégradation ultra rapide	sucres solubles	4-8 p. 100/mn
protéines solubles rapidement dégradables	0,5-4,5 p. 100/mn	amidon, pectines	20-80 p. 100/h
protéines insolubles progressivement dégradables <i>selon la nature des protéines</i>	2-30 p. 100/h	cellulose très fermentescible	4-12 p. 100/h
azote indégradable et indigestible	0	cellulose peu fermentescible	1-3 p. 100/h
		fibres lignifiées	0

Tableau 16: Vitesse de dégradation dans le rumen des protides et des glucides (99)

Par ailleurs, la synthèse bibliographique réalisée par Sauvants (1997) révèle que l'ingestion d'amidons rapides tend à diminuer la teneur en ammoniacque ruminal (car il peut être utilisé rapidement grâce à l'énergie disponible) et que les sources d'azote rapide tendent à augmenter cette même teneur en ammoniacque ruminal (91). La confrontation de ces observations permet de penser que l'amidon rapide associé à l'azote rapide fournira le meilleur rendement de synthèse microbienne, puisque l'ammoniacque abondant lié à la source d'azote rapide sera utilisé au fur et à mesure grâce à la source d'énergie rapide.

En effet, plusieurs expériences illustrent cette hypothèse: Matras et al (1991), in (96) ont montré que les agneaux à l'engrais ingérant de l'orge avaient de meilleures performances avec une source d'azote rapide telle que l'urée, alors que ceux nourris avec du maïs présentent leur meilleur rendement quand une source azotée plus lente est distribuée, telle que la farine de sang; les performances obtenues avec les deux sources rapides étant meilleures.

De même, Herrera-Saldana et al. (1990) ont montré que l'association d'amidon rapide avec une source d'azote rapide accroît la production de protéines microbiennes (34)(40)(35).

Il ressort de cette analyse que, dans l'intérêt du ruminant et des performances zootechniques, la ration doit apporter une quantité optimale d'azote disponible dans le rumen et libéré en temps utile par rapport à la libération d'énergie, en évitant que l'énergie soit le facteur limitant, ce qui provoquerait un gaspillage d'azote.

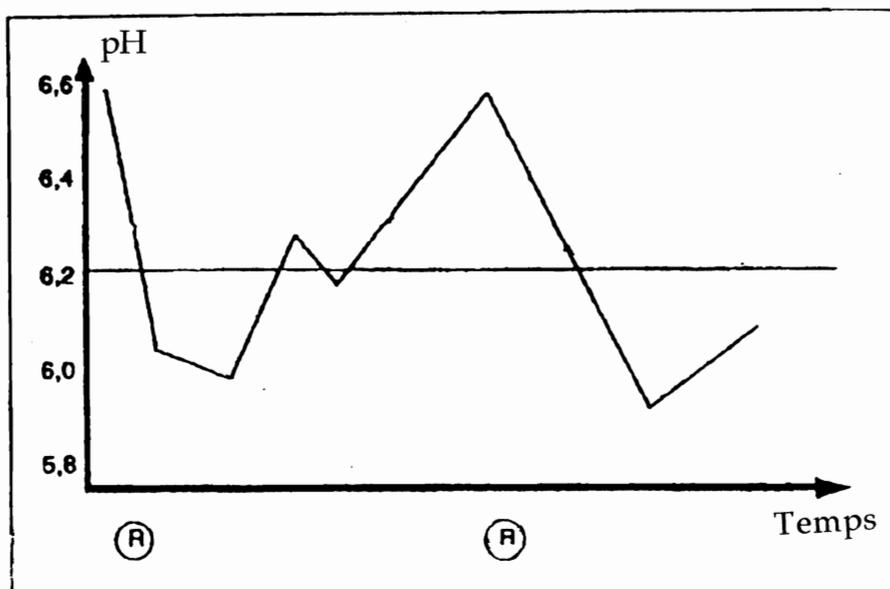
Toutefois, cette contrainte tout à fait justifiée sur un plan métabolique est à relativiser en pratique en fonction du mode de distribution des concentrés. Il semble en effet qu'elle soit bien à prendre en considération quand l'apport de concentrés est peu réparti sur la journée. Mais des expériences récentes (menées sur les vaches laitières recevant des repas de concentrés étalés sur la journée) montrent peu d'influence des différences de cinétique de dégradation entre les sources d'énergie et d'azote sur les performances (91), ce qui pourrait s'expliquer par la disparition de la discontinuité des apports avec ce mode de distribution qui atténue cette contrainte (63).

3- Modes de distribution

Pour des raisons pratiques, les concentrés étaient classiquement et jusqu'à ces dernières années distribués en deux repas quotidiens, généralement au moment de la traite des vaches laitières. Mais si cette méthode, bien que loin d'être parfaite, peut convenir pour des apports modérés en concentrés, elle présente des limites pour des apports élevés en concentrés énergétiques, ce qui est de plus en plus fréquent étant donné le niveau génétique croissant des vaches laitières.

En effet comme l'a remarqué Kaufmann (1976), le pH ruminal subit une chute brutale après les repas de concentrés, jusqu'à des valeurs inférieures à 6,2 avec les conséquences néfastes que nous avons déjà évoquées.

C'est ce que montre la courbe de la **figure 44** ci-dessous:



(R = repas de concentré)

Figure 44: Evolution du pH ruminal en fonction des repas de concentrés (d'après Kaufmann (1976), in (43))

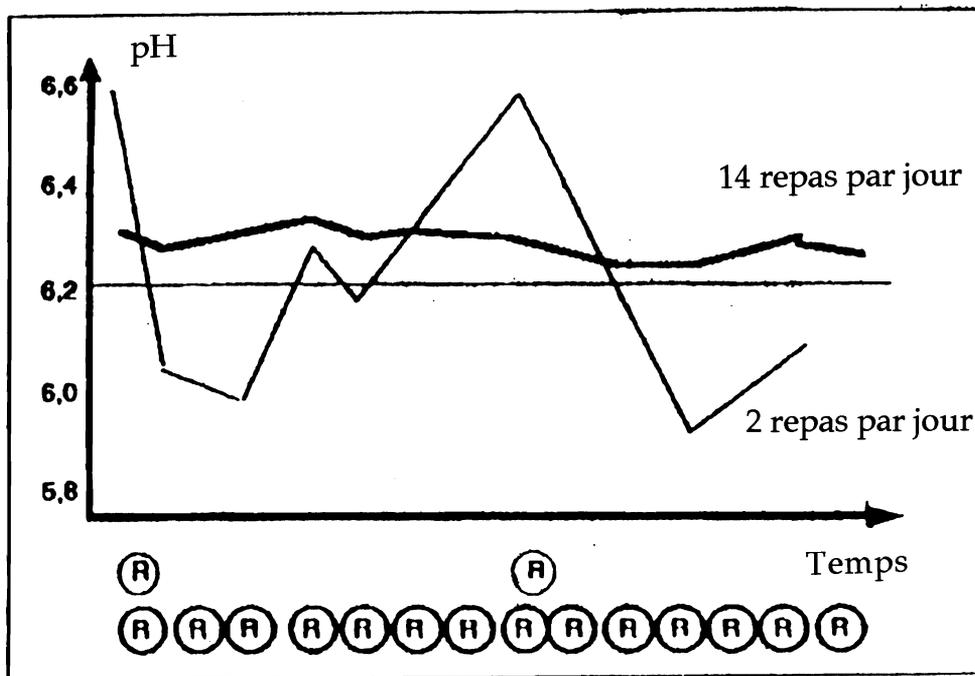
En effet la diminution de pH s'autoaggrave si elle est amorcée et si les fermentations rapides continuent. Ainsi, au-delà de certaines quantités de concentrés énergétiques, notamment d'amidons rapides, il est indispensable

d'envisager d'autres méthodes de distribution pour éviter ces diminutions de pH préjudiciables aux ruminants. Il faut soit augmenter le nombre de repas de concentrés énergétiques pour diminuer leur volume, soit incorporer les concentrés à la ration de base pour que leur ingestion soit étalée dans le temps. Le but est d'éviter que le pH ne descende au dessous de 6,2, valeur au-dessous de laquelle la flore cellulolytique est inhibée.

a) Multiplier le nombre de repas et diminuer la quantité de concentré par repas:

Quel que soit le niveau d'apport de concentré énergétique, l'étalement des apports dans le temps est bénéfique pour le ruminant pour plusieurs raisons.

Tout d'abord les quantités de concentré ingérées par repas étant moindres, les perturbations de la micropopulation ruminale sont diminuées, puisque les diminutions de pH sont plus faibles.



(R = repas de concentrés)

Figure 45: Evolution du pH ruminal en fonction du nombre de repas (d'après Kaufmann (1976), in (43))

Il en résulte une meilleure digestion des fibres, d'où une ingestion supérieure qui se répercute sur la production de lait.

L'autre intérêt de l'étalement des apports dans le temps est la meilleure utilisation par les animaux de ces concentrés ingérés. En effet, Beauchemin et al. (1993) (3) ont remarqué que lors d'ingestion massive et précipitée de concentrés (notamment en salle de traite), les animaux mastiquent moins et les particules avalées sont moins endommagées donc moins bien digérées, y compris dans l'intestin, d'où le gaspillage.

Aussi, cet étalement évitant une production massive et brutale d'acide propionique (C3) évite une baisse trop importante du taux butyreux (19).

La principale façon d'étaler dans le temps ces apports de concentrés est le distributeur automatique de concentrés (D.A.C.), qui représente cependant un investissement important. Sinon, il faut de la main d'œuvre pour distribuer plus souvent dans la journée des petites quantités de concentrés aux animaux. Il restait la question de la répartition de ces repas de concentrés sur la journée, car on pensait qu'il fallait éviter des apports de concentrés trop éloignés des repas de fourrage, c'est à dire à un moment où le rumen est peu tamponné. En fait, les expérimentations menées par Robinson (1994) ne révèlent pas d'inconvénient majeur à des repas de concentrés éloignés de ceux de fourrages, dans la mesure où les quantités de concentrés ingérées sont faibles à chaque repas (81).

b) Mélanger les concentrés à la ration de base:

C'est le système des rations complètes. Tous les ingrédients étant en principe mélangés de façon homogène, chaque bouchée du ruminant contient la même proportion de concentrés. Grâce au fourrage ingéré simultanément et à condition que la ration ne soit pas trop hâchée par la mélangeuse, la fibrosité de la ration est conservée à chaque bouchée. Ainsi la mastication et la salivation sont maintenues et le pouvoir tampon (lié aux bicarbonates de la salive) s'exerce au fur et à mesure que les concentrés sont ingérés. Le pH ruminal reste alors plus stable qu'avec les autres modes de distribution, et la digestion des fibres n'est pas diminuée (même avec des proportions élevées de concentrés) (63).

Avec ce mode de distribution la teneur minimale en cellulose brute de la ration peut être abaissée jusqu'à 14% environ (au lieu de 17% avec les modes de

distribution classiques) sans qu'il n'apparaisse de troubles digestifs (37).

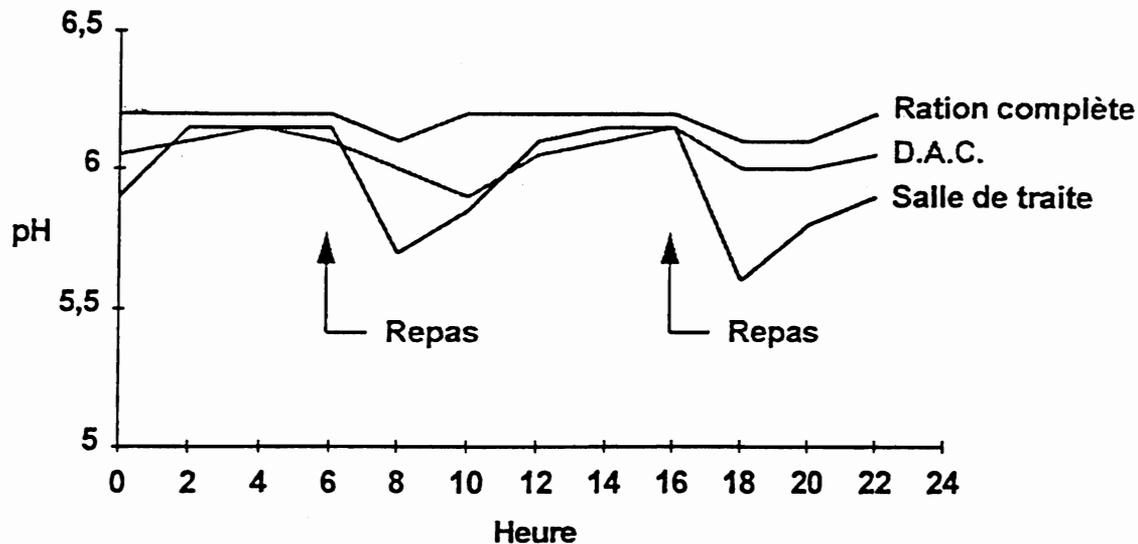


Figure 46: Effet du mode de distribution des concentrés sur le pH ruminal (Enjalbert, 1996, communication personnelle)

Aussi, le mélange étant homogène, l'appétibilité élevée et équivalente de chaque bouchée permet aux animaux une ingestion non précipitée à la différence des concentrés distribués seuls, d'où une mastication supérieure, une meilleure salivation et un endommagement des particules de concentrés plus important (3). Arzul (1994) a observé que les troupeaux étaient moins stressés, et qu'il y avait moins de bousculades (1). De même, la contrainte (controversée par certains auteurs) de la synchronisation des disponibilités entre azote et énergie est atténuée puisque les apports de tous les nutriments sont davantage répartis sur la journée.

Les performances sont d'ailleurs le reflet de l'efficacité de ce mode de distribution, notamment pour des apports élevés de concentrés: on constate qu'avec 40% de fourrage et 60% de concentrés, la différence entre la distribution classique des concentrés et la ration complète est nette concernant la matière sèche ingérée, la production laitière et le taux butyreux, reflétant le bon fonctionnement du rumen (Phipps et al., 1984, in (63)).

Cependant, malgré tous ses avantages, ce mode de distribution peut présenter un risque sanitaire si le mélange est trop broyé; on perd ainsi une partie de son intérêt, car la fibrosité diminue et les fermentations s'orientent vers une augmentation de la production de C3, le niveau d'apport de concentré aggravant rapidement cette déviation (21). Aussi l'investissement dans une mélangeuse ne se justifie que pour les troupeaux homogènes ou de taille suffisamment importante pour pouvoir faire des lots. En cas d'hétérogénéité du troupeau trop marquée, il vaut mieux une ration semi-complète, c'est-à-dire incorporer les concentrés jusqu'au niveau des plus faibles productrices; le supplément pour les meilleures vaches est alors donné individuellement.

Malgré ces limites, ce mode de distribution est très intéressant et peut même s'envisager sans matériel de mélange, mais avec de la main d'œuvre et de " l'huile de coude."

Conclusion:

Il apparaît ainsi que la distribution raisonnée des concentrés énergétiques est toujours préférable, et même indispensable au-delà d'une certaine quantité. Etant donné les faibles différences observées entre les deux stratégies de distribution des concentrés citées sur les performances zootechniques et la santé des animaux, le choix dépendra surtout du type de troupeau et des infrastructures (55).

c) Respect des transitions alimentaires:

Nous avons vu dans la première partie que les protozoaires pouvaient séquestrer une partie de l'amidon, et ainsi exercer un rôle "tampon" en freinant leur dégradation. Cette propriété des protozoaires permet d'éviter des chutes de pH trop importantes lors des repas de concentrés énergétiques. Mais ils sont très sensibles au pH et si la micropopulation amylolytique se développe trop vite, ils n'ont pas le temps de remplir leur rôle et sont, à terme, détruits. C'est pourquoi, lors de distribution croissante de concentrés énergétiques, en particulier pour les vaches laitières en début de lactation, il faut ménager des transitions pour permettre aux protozoaires de se multiplier suffisamment au fur et à mesure que les apports augmentent, afin que la séquestration de l'amidon qu'ils exercent

puisse être suffisante pour éviter les fermentations trop rapides. D'ailleurs, ces transitions permettent aussi le développement des papilles ruminales, responsables de l'absorption des acides gras volatils libérés par les fermentations (22). Cela évite les accumulations d'acides gras volatils dans le rumen, donc la diminution de pH, et leur évacuation vers la caillette où ils peuvent favoriser des troubles (dilatation, atonie). On recommande en général de ne pas augmenter la quantité de concentrés de plus de 300g par jour (soit à peu près 2 kg par semaine) (4)(22).

CONCLUSION

Cette étude montre les grandes différences de digestion ruminale entre les sources d'amidon, au sein même des céréales. C'est la raison pour laquelle il est indispensable de préciser quelle matière première on considère lorsque l'on parle de concentré énergétique à base d'amidon. Par ailleurs nous avons vu qu'il est possible de modifier, par l'application de différents traitements, la cinétique de cette dégradation ruminale, le but étant de trouver un compromis entre l'optimisation de la digestion (offrant le meilleur rendement nutritionnel et métabolique) et la santé du ruminant. Cette gestion est particulièrement difficile pour les animaux à haut niveau de production pour lesquels la marge de manoeuvre entre les déficits énergétiques et l'apparition de troubles sanitaires (par acidose chronique du rumen) est très étroite. En fait l'objectif est d'obtenir une digestibilité ruminale importante sans qu'elle soit trop rapide. A l'heure actuelle, la gestion de la distribution des aliments concentrés semble la principale méthode permettant de résoudre ce problème, bien que l'application de traitements chimiques tels que la pulvérisation au formol, encore peu utilisée aujourd'hui, puisse être intéressante. Aussi le principe des traitements à base de soude est satisfaisant, mais il donne lieu à de nombreux problèmes d'ordre pratique. En revanche on peut penser que la sélection de grains à péricarpe moins résistant pourrait présenter un intérêt, puisque cela permettrait d'éviter le traitement mécanique minimum indispensable (donnant l'accès direct des microorganismes à l'endosperme), et par conséquent serait peut-être en faveur d'une dégradation ruminale de l'amidon plus progressive.

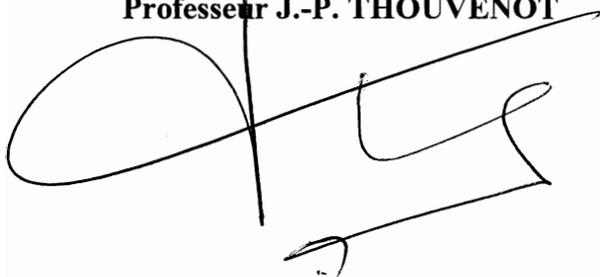
VU : Le Professeur de l'Ecole Vétérinaire
Rapporteur
Professeur F. ENJALBERT



VU : le Directeur par intérim
de l'Ecole Vétérinaire
Monsieur G. BONNES



VU : Le Président de la thèse
Professeur J.-P. THOUVENOT



VU et PERMIS D'IMPRIMER
Toulouse, le 15 janvier 2004
Le Président de l'Université Paul Sabatier
Professeur R. BASTIDE

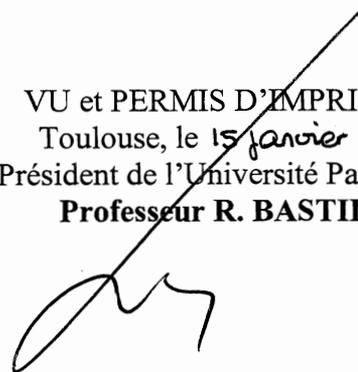


TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1:	Schéma récapitulatif de la digestion dans le rumen	p 6
Figure 2:	Bactéries en cours de digestion d'un granule d'amidon	p 8
Figure 3:	Activité fermentaire en fonction du pH ruminal	p 9
Figure 4:	Schéma général d'une cellule végétale	p 15
Figure 5:	Coupe schématique des grains de maïs et de blé	p 19
Figure 6:	Les différents glucides végétaux	p 21
Figure 7:	Premières étapes de la dégradation des glucides dans le rumen	p 23
Figure 8:	Production d'acide acétique	p 24
Figure 9:	Production d'acide propionique	p 25
Figure 10:	Production d'acide butyrique	p 26
Figure 11:	Résumé des voies biochimiques de la dégradation des glucides dans le rumen	p 27
Figure 12:	Liaison entre la teneur en cellulose brute de la ration et la proportion d'acide acétique dans le rumen	p 29
Figure 13:	Influence du niveau d'incorporation d'aliments concentrés sur les fermentations acétique et propionique dans le rumen	p 29
Figure 14:	Influence de la teneur en sucres solubles sur les fermentations ruminales de la vache laitière	p 30
Figure 15:	Influence de la digestibilité globale de la ration sur les proportions d'AGV dans le rumen	p 31
Figure 16:	Influence du pH ruminal sur le profil des AGV (pourcentages molaires)	p 33

Figure 17:	Cinétique de dégradation in sacco des amidons: courbe générale	p 37
Figure 18:	Cinétique de dégradation in sacco de l'amidon des principaux aliments	p 39
Figure 19:	Valeur de la dégradabilité théorique DT6 en fonction des paramètres a et c	p 41
Figure 20:	Relation entre la digestibilité préduodénale de l'amidon et sa dégradabilité théorique DT6 in sacco	p 42
Figure 21:	Digestion comparée in vitro de l'amidon isolé de maïs et d'orge	p 45
Figure 22:	Endosperme de maïs observé au microscope électronique après 48h d'incubation dans le rumen	p 46
Figure 23:	Cinétique de dégradation des protéines et de l'amidon des grains d'avoine, d'orge, de blé et de maïs	p 47
Figure 24:	Effet de l'ajout de protéase sur la dégradation in vitro de l'amidon de maïs	p 48
Figure 25:	Relation entre la teneur en α , β , δ -zéine et la dégradabilité de l'amidon	p 50
Figure 26:	Aspect du péricarpe de maïs après 48h d'incubation dans le rumen	p 52
Figure 27:	Effet de la taille des particules sur la dégradation "in vitro" de l'amidon de maïs et d'orge	p 55
Figure 28:	Influence du traitement d'extrusion sur la dégradation "in situ" de l'amidon de pois	p 58
Figure 29:	Effet du floconnage à la vapeur sur la digestion de l'amidon	p 58
Figure 30:	Observation au microscope électronique de la dégradation d'endosperme d'orge avec ou sans traitement au formol	p 62
Figure 31:	Effet du traitement au formol des grains broyés d'orge sur la dégradation de l'amidon et la production d'ammoniaque "in vitro"	p 63
Figure 32:	Influence du niveau d'alimentation sur la digestion ruminale de l'amidon	p 66

Figure 33:	Influence de la teneur en concentré de la ration sur la digestion ruminale de l'amidon	p 67
Figure 34:	Influence de la ration de base sur les paramètres de dégradation "in sacco" des amidons lents	p 68
Figure 35:	Effet de l'association de maïs-grain humide avec du sorgho aplati sur la digestion ruminale in vivo de l'amidon	p 69
Figure 36:	Variations de la protéosynthèse microbienne selon la digestibilité ruminale de l'amidon	p 73
Figure 37:	Variations de la protéosynthèse microbienne selon la teneur en amidon digestible ruminal	p 74
Figure 38:	Relation entre la digestibilité ruminale de l'amidon et la valeur énergétique du régime (en UFL)	p 74
Figure 39:	Influence de la nature et de la vitesse de dégradation de l'amidon sur le rapport fermentaire (acétate+butyrate)/propionate	p 75
Figure 40:	Interaction entre pH ruminal et vitesse de dégradation de l'amidon	p 76
Figure 41:	Variations de la partition de l'amidon digéré entre l'intestin grêle et le gros intestin	p 78
Figure 42:	Interaction entre taux butyreux du lait et vitesse de dégradation de l'amidon	p 84
Figure 43:	Effet de l'association de maïs-grain humide avec du sorgho aplati sur le rapport gain de poids/quantité ingérée de boeufs à l'engrais	p 90
Figure 44:	Evolution du pH ruminal en fonction des repas de concentrés	p 94
Figure 45:	Evolution du pH ruminal en fonction du nombre de repas de concentrés	p 95
Figure 46:	Effet du mode de distribution des concentrés sur le pH ruminal	p 97
Tableau 1:	Substrats dégradés et fermentés par les principales bactéries du rumen	p 11

Tableau 2:	Influence de la forme de présentation des aliments sur la composition du mélange d'AGV dans le rumen	p 32
Tableau 3:	Valeurs des paramètres de dégradation in sacco de l'amidon des principaux aliments	p 38
Tableau 4:	Valeurs de la dégradabilité théorique DT6 de l'amidon des principaux aliments	p 40
Tableau 5:	Dégradabilité théorique des amidons et estimation des teneurs en amidon soluble, digestible et "by-pass" des principaux aliments des ruminants	p 43
Tableau 6:	Influence de la texture du grain de maïs sur la dégradation de l'amidon	p 49
Tableau 7:	Comparaison de la digestibilité ruminale de l'amidon de maïs de variété "high-lysine" et normal	p 50
Tableau 8:	Influence du stade de récolte des grains de maïs sur la dégradation de l'amidon	p 51
Tableau 9:	Paramètres de dégradation de l'amidon des grains entiers et masticués par des bovins adultes	p 53
Tableau 10:	Effet du type de traitement mécanique du grain de maïs sur les paramètres de digestion ruminale "in situ" des glucides cytoplasmiques	p 55
Tableau 11:	Cinétique de dégradation de l'amidon de maïs après mouture fine ou floconnage à la vapeur	p 59
Tableau 12:	Influence de l'ensilage des grains de maïs sur la digestion ruminale de l'amidon	p 60
Tableau 13:	Influence du traitement au formol sur la digestion ruminale de l'amidon et des protéines de blé et de maïs	p 64
Tableau 14:	Digestibilité moyenne de l'amidon des principaux aliments dans les différents segments du tube digestif des ruminants	p 80
Tableau 15:	Effet du traitement de l'orge par la soude sur les performances laitières	p 88
Tableau 16:	Vitesse de dégradation dans le rumen des protides et des glucides	p 93

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

1. ARZUL, Ph., 1994, Réflexions sur la pratique des rations complètes, Bulletin des GTV, 94-5-B-496, 187-200
2. AXE, D.E., BOLSEN, K.K., HARMON, D.L., LEE, R.W., MILLIKEN, G.A., AVERY, T.B., 1987, Effect of wheat and high-moisture sorghum grain fed singly or in combination on ruminal fermentation, solid and liquid flow, site and extent of digestion and feeding performance of cattle, J. Anim. Sci., **64**: 897-906
3. BEAUCHEMIN, K.A., MC ALLISTER, T.A., DONG, Y., FARR, B.I., CHANG, K.J., 1993, Effects of mastication on digestion of whole cereal grains by cattle, J. Anim. Sci., **72**, 236-246.
4. BEDOUEY, J., 1990, Suivi global du troupeau laitier, Supplément technique n° 14 de la dépêche vétérinaire du 19 mai 90 au 1 juin 90
5. BOHARTIER, J., 1991, The rumen protozoa: taxonomy, cytology and feeding behaviour, in Rumen microbial metabolism and ruminal digestion, 27-38
6. BRUGERE, H., 1983, Biochimie du rumen- aspects physiologiques, Bull. des GTV, 83-3-B-254, 5-23
7. CAMPLING, R.C., 1991, Processing cereal grains for cattle- a review, Livestock production science, **28**, 223-234.
8. CERNEAU, P., MICHELET-DOREAU, B., 1990, In situ starch degradation of different feeds in the rumen, Reprod. Nutr. Dev., **31**, 65-72.
9. CHAPOUTOT, P., SAUVANT, D., Les variations de la dynamique de la digestion dans le rumen des constituants glucidiques des aliments concentrés et sous-produits, Station de nutrition et Alimentation (INRA),

Institut National Agronomique Paris-Grignon

10. CHENAIS, F., 1999, Interview: "Moins de soucis avec le maïs-grain", Production Laitière Moderne, juin 1999, 34-35
11. CHRISTEN, S.D., HILL, T.M., and WILLIAMS, M.S., 1996, Effects of tempered barley on milk yield, intake, and digestion kinetics of lactating holstein cows, J. Dairy Sci., **79**: 1394-1399
12. COLIN-SCOELLEN, O., JURGANZ, S., GARDEUR, J.N., LAURENT, F., 1995, Effet de la nature de l'aliment concentré sur les performances zootechniques de vaches laitières recevant une ration complète, Ann. Zootech., **44**, 359-372
13. COLONNA, P., et Al., 1995, Chap. 3: Constituants des céréales, des graines, des fruits et de leurs sous-produits, in "Nutrition des ruminants domestiques", INRA Ed., 83-119
14. COULON, J.B., FAVERDIN, P., LAURENT, F., COTTO, G., 1989, Influence de la nature de l'aliment concentré sur les performances des vaches laitières, INRA Prod. Anim., 2 (1), 47-53
15. COULON, J.B., DIDI, M., et REMOND, B., 1985, Utilisation du blé par les vaches laitières: influence de la forme de présentation, Bull. tech. C.R.Z.V. Theix, INRA, **62**, 27-33
16. DADO, R.G., BEEK, S.D., 1998, In vitro ruminal starch digestibility in opaque-2 and regular corn hybrids, Animal Feed Science and Technology, **73**, 151-160.
17. DE SMET, A.M., DE BOEVER, J.L., DE BRABANDER, D.L., VANACKER, J.M., BOUCQUE, Ch.V., 1995, Investigation of dry matter degradation and acidotic effect of some feedstuffs by means of in sacco and in vitro incubation, Animal feed science and technology, **51**, 297-315

18. DORE,J., GOUET,Ph., 1991, Microbial interactions in the rumen, in Rumen microbial metabolism and ruminant digestion, INRA Ed., 71-88
19. ENJALBERT, F., 1994, Alimentation et composition du lait de vache, Le point vétérinaire, vol. 25, n° 156, déc. 1993-janv. 1994, 37-46
20. ENJALBERT, F.,1994, Recommandations pour le rationnement des vaches laitières: évolution et informatisation, GTV-94-5-B-483, 11-19
21. ENJALBERT, F., 1995, Conseil alimentaire et maladies métaboliques en élevage, Le point vétérinaire, vol. 27, numéro spécial "maladies métaboliques des ruminants", 27: 713-718
22. ENJALBERT, F., 1995, Rationnement en peripartum et maladies métaboliques, Le point vétérinaire, vol. 27, numero spécial "maladies métaboliques des ruminants", 719-725
23. ENJALBERT,F.,1996 , Le métabolisme des bovins: synthèse des productions (lait et viande), Journées nationales des GTV, 37-43
24. ENJALBERT, F., 1996, Les constituants des aliments et leur digestion chez les bovins: bases physiologiques, Journées nationales des GTV, 13-20
25. EVERS , A.D., BLAHENEY, A.B., O'BRIEN, L., 1999, Cereal structure and composition, Austr. J. Agric. Res., 50, 629-650
26. FLACHOWSKY,G., BALDEWEG,P., and SCHEIN, G., 1992, A note on in sacco dry matter degradability of variously processed maïze grains and of different maïze varieties in sheep, Animal feed science and technology, 39, 173-181
27. FLUHARTY, F.L., LOERCH, S.C., 1989, Chemical treatment of ground corn to limit ruminal starch digestion, Can. J. Anim. Sci., 69, 173-180.
28. FONTY, G., 1991, The rumen anaerobical fungi, in Rumen microbial

- metabolism and ruminal digestion, INRA Ed., 53-70
29. FONTY,G., JOUANY,J.P., FORANO, E., GOUET, Ph., 1995, Chap. 8: L'écosystème microbien du réticulo-rumen, Nutrition des ruminants domestiques, Ed. INRA, 299-349
 30. GALYEAN, M.L., WAGNER, D.G. OWENS,F.N.,, 1981, Dry matter and starch disappearance of corn and sorghum as influenced by particle size and processing, J. Dairy. Sci., **64**, 1804.
 31. GIBOUDEAU, B., 1997, Dynamique de digestion, Bulletin des GTV, 97-1-B-540,57-77
 32. GRENET, E., 1997, Aspects microscopiques de la dégradation microbienne des tissus végétaux dans le rumen, INRA Prod. Anim., **10(3)**, 241-249
 33. HERRERA-SOLDANA, R.E., HUBER, J.T., POORE, M.H., 1990, Dry matter, crude protein, and starch degradability of five cereal grains, J. Dairy Science, **73**, 2386-2393.
 34. HERRERA-SALDANA, R.E., HUBER, J.T., 1989, Influence of varying protein and starch degradabilities on performance of lactating cows, Journal of dairy science, Vol. 72, N° 6, 1477-1483
 35. HERRERA-SALDANA, R., GOMEZ-ALARCON,R., TORABI, M., HUBER, J.T., 1990, Influence of synchronizing protein and starch degradation in the rumen on nutrient utilization and microbial protein synthesis, J. Dairy Sci., **73**: 142-148
 36. HINDERS, RAY, 1998, Increased non-fiber carbohydrate digestion may improve production, Feedstuffs, January 12, 10-11
 37. HODEN,A., GIGER, S.,1984, Les rations complètes pour vaches laitières- revue bibliographique-, Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, INRA, **57**, 45-50

38. HUNT, CARL, W., 1996, Factors affecting the feeding quality of barley for ruminants, *Anim. Feed Sci. and Techn.*, **62**, 37-48.
39. HUNTINGTON, Gerald B., 1994, Ruminant starch utilization has been extensive, *Feedstuffs*, june 6, 16-43
40. HUNTINGTON, Gerald B., 1997, Starch utilisation by ruminants: from basics to the bunk, *J. Anim. Science*, **78**, 852-867
41. JARRIGE, R., GRENET, E., DEMARQUILLY, C., BESLE, J.M., 1995, Chap. 2: Les constituants de l'appareil digestif des plantes fourragères, in "Nutrition des ruminants domestiques", INRA Ed., 25-75
42. JOUANY, J.P. , et al, 1995, Chap. 9: Métabolisme et nutrition de la population microbienne du rumen, in "Nutrition des ruminants domestiques", INRA Ed., 350-382
43. JOUET, L., 1996, Avantages et inconvénients des différents systèmes de distribution chez la vache laitière, *Journées Nationales des GTV*, pp.53-55
44. JOURNET, M., HUNTINGTON, Gerald B., PEYRAUD, J.L., 1995, Chap. 19: Le bilan des produits terminaux de la digestion, in "Nutrition des ruminants domestiques", INRA Ed., 671-714
45. JURJANZ, S., COLIN-SCHOELLEN, O., GARDEUR, J.N., LAURENT, F., 1998, Alteration of milk fat by variation in the source and amount of starch in a total mixed diet fed to dairy cows, *J. Dairy Sci.*, **81**: 2924-2933
46. KAISER, A.G., 1999, Increasing the utilization of grains when fed whole to ruminants, *Austr. J. Agric. Res.*, **50**: 737-756
47. LAURENT, F., 1988, Utilisation du blé et des céréales dans la ration des vaches laitières, *Ann. Zootech.*, **37(2)**, 117-132.

48. LAURENT, F, GARDEUR, J.N., 1989, Effet de la nature et du niveau d'apport en aliment concentré sur les performances de vaches laitières recevant une ration à base d'ensilage de maïs, *Ann. Zootech.*, **38**, 247-258
49. LYKOS, T., VARGA, G.A., 1995, Effects on processing method on degradation characteristics of protein and carbohydrate sources in situ, *J. Dairy Science*, **78**, 1789-1801.
50. LYKOS, T., VARGA, G.A., CASPER, D., 1997, Varying degradation rates of total nonstructural carbohydrates: effects on ruminal fermentation, blood metabolites, and milk production and composition in high producing holstein cows, *J. Dairy Sci.*, **80**: 3341-3355
51. MC ALLISTER, T.A., RODE, L.M., CHANG, K.J., BUCHANAN-SMITH, J.G., 1990, Effect of microbial colonization on cereal grain digestion, *Can. J. Anim. Sci.*, **70**, 571-579.
52. MC ALLISTER, T.A., CHENG, K.J., RODE, L.M., BUCHANAN-SMITH, J.G., 1990, Use of formaldéhyde to regulate digestion of barley starch, *Can. J. Anim. Sci.*, **70**, 581-589.
53. MC ALLISTER, T.A., PHILIPPE, R.C., RODE, L.M., CHANG, K.J., 1993, Effect of the protein matrix on the digestion of cereal grains by ruminal microorganisms. *J. Anim. science*, **71**, 205-212.
54. MC aALLISTER T.A., CHENG, K.J., 1996, Microbial strategies in the ruminal digestion of cerealgrains, *Animal Feed Science Technologi*, **62**, 29-36.
55. MALTZ, E., DEVIR, S., KROLL, O., ZUR, B., SPAHR, S.L., and SHANKS, R.D., 1992, Comparative response of lactating cows to total mixed rations or computerized individual concentrates feeding, *Journal of dairy science*, vol. 75, N°6, 1588-1603
56. MATHISON, G.W, HIROKANA, R., ERRIGAN,B.K., VLACH, I.,

- MILLIGAN, L.P., and WEISENBURGER, R.D., 1991, Rate of starch degradation, apparent digestibility and rate and efficiency of steer gain as influenced by barley grain volume-weight and processing method, *Can. J. Anim. Sci.*, **71**: 867-878
57. MATHISON, G.W, 1996, Effect of processing on the utilisation of grain by cattle, *Anim. Feed. Science and Technology*, **58**, 113-125.
58. MAYNE, C.S., AND DOHERTY, J.G., 1996, The effects of fine grinding or sodium hydroxide treatment of wheat, offered as part of a concentrate supplement, on the performance of lactating dairy cows, *Animal science*, **63**: 11-19
59. MICHALET-DOREAU, B., DOREAU, R.L., 1986, Maize genotype and ruminant nutrition, *Science des aliments*, **19**, 349-365.
60. MICHALET-DOREAU, B., SAUVANT, D., 1989, Influence de la nature du concentré, céréales ou pulpe de betterave, sur la digestion chez les ruminants, *INRA Prod. Anim.*, **2(4)**, 235-244
61. MICHALET-DOREAU, B., PHILIPPEAU, C., DOREAU, M., 1997, In situ and in vitro ruminal starch degradation of untreated and formaldehyde-treated wheat and maize, *Reprod; Nutr. Dev.*, **37**, 305-312
62. MORAN, J.B., 1986, Cereal grains in complete diets for dairy cows: a comparison of rolled barley, wheat and oats and of three methods of processing oats, *Anim. Prod.*, **43**: 27-36
63. N'GUYEN, Pr, BLAIN, J.J., 1987, L'alimentation des vaches laitières en lots, *Bulletin des GTV*, 87-6-B-314, 87-111
64. NICOL, J.M., 1994, Quelques clés pour comprendre la nutrition des vaches laitières, *Bulletin des GTV*, 94-5-B-484, 21-52
65. NOCEK, J., 1991, Manipulation de la disponibilité dans le rumen des

- glucides et des protides dans les rations de la vache laitière, GTV, 91-3-B-381, 49-57
66. NOCEK, JAMES, TAMMINGA, SEERP, 1991, Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effects on milk yield and composition, *J. Dairy Sci.*, **74**, 3598-3629.
 67. OLIVEIRA, J.S., HUBER, J.T., BEN-GHEDALIA, D., SWINGLE, R.S., THEURER, C.B., and PESSARAKLI, M., 1993, Influence of sorghum grain processing on performance of lactating dairy cows, *J. Dairy Sci.*, **76**: 575-581
 68. O'MARA, F.P., MURPHY, J.J., and RATH, M., 1997, The effect of replacing dietary beet pulp with wheat treated with sodium hydroxide, ground wheat, or ground corn in lactating cows, *J. Dairy Sci.*, **80**: 530-540
 69. ORSKOV, R.R., 1986, Starch digestion and utilization in ruminants, *J. Anim. Sci.*, **63**:1624-1633
 70. ORTEGA-CERRILLA, M.E., FINLAYSON, H.J., ARMSTRONG, D.G., 1999, The effect of chemical treatment of barley on starch digestion in ruminants, *Animal Feed Science and Technology*, **77**: 73-81
 71. ORTEGA-CERRILLA, M.E., FINLAYSON, H.J., ARMSTRONG, D.G., 1999, Protection of starch in barley against rumen degradation by glutaraldehyde and formaldehyde as assessed by the dacron bag technique, *Animal feed science and technology*, **77**: 83-90
 72. OWENS, F.N., ZINN, R.A., KIM, Y.K., 1986, Limits to starch digestion in the ruminant small intestine, *J. Anim. Sci.*, **63**: 1634-1648
 73. PACCARD, P., AUGÉARD, P., MASSON, D., JOUANY, J.P., 1992, Métabolisme du rumen: résumé des interventions et aspects pratiques, GTV, 92-3-B-425, 19-45

74. PEYRAUD, J.L., 1993, Influence de la proportion et de la nature du concentré énergétique dans la ration sur la digestion, Journées AFTAA-CAAA Le Mans
75. PHILIPPEAU, C., MICHELET-DOREAU, B., 1997, Influence of genotype and stage of maturity of maize on rate of ruminal starch degradation, *Animal Feed Science and technology*, **68**, 23-35.
76. PHILIPPEAU, C., MICHELET-DOREAU, B., 1997, Influence of genotype and ensiling of corn grain on in situ degradation of starch in the rumen, *J. Dairy. Sci.*, **81**, 2178-2184.
77. PHILIPPEAU, C., LE DESCHAULT DE MONREDON, F., MICHELET-DOREAU, B., 1998, Relationship between ruminal starch degradation and physical characteristics of corn grain, *J. Anim. Sci.*, **77**, 238-243.
78. PRINS, R.A., 1991, The rumen ciliates and their functions, in "Rumen microbial metabolism and ruminal digestion", INRA Ed., 39-52
79. RICHARDS, C.J., PEDERSEN, J.F., BRITTON R.A., KREHBIEL, C.R., 1995, In vitro starch disappearance procedure modifications, *Animal Feed Science and Technology*, **55**, 34-45.
80. ROBINSON, P.H., TAMMINGA, S., and VAN VUUREN, A.M., 1986, Influence of declining level of feed intake and varying the proportion of starch in the concentrate on rumen fermentation of dairy cows, *Livestock production science*, **15**, 173-179
81. ROBINSON, P.H., 1994, Strategies of feeding high-energy supplements to primiparous dairy cows, *Canadian Journal of Animal Science*, **74**: 487-493
82. ROONEY, L.W. and PFLUGFELDER, R.L., 1986, Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn, *J. Anim. Sci.*, **63**: 1607-1623

83. ROWE, J.B., CHOCT, M., PETHICK, D.W., 1999, Processing cereal grains for animal feeding, *Austr. J. Agric. Res.*, **50**, 721-736.
84. SAUVANT, D., MICHALET-DOREAU, B., 1988, Chap. 17: Les aliments concentrés, in "Alimentation des bovins, ovins, caprins", INRA Ed., 337-345
85. SAUVANT, D., 1988, La modélisation de la digestion dans le rumen, *Reprod. Nutr. Developp.*, 28 suppl n°1, 33-53
86. SAUVANT, D., ARCHIMEDE, H., La partition de la digestion des glucides chez le ruminant, Station de nutrition et alimentation (INRA), INA-PG
87. SAUVANT, D., RAMANGASOAVINA, B., 1991, Rumen modelling, in "Rumen microbial metabolism and ruminal nutrition", INRA Ed., Paris, 283-296
88. SAUVANT, D., DIJKSTRA, J., MERTENS, D., 1995, Optimisation of ruminal digestion: a modelling approach, in: JOURNET, M., GRENET, E., FARCE, M.H., THERIEZ, M., DEMARQUILLY, C., Recents developments in the nutrition of herbivores, Proceedings of the IVth International Symposium on the Nutrition of Herbivores, INRA Editions, Paris, 143-165
89. SAUVANT, D., GRENET, E., DOREAU, M., 1995, Chap. 10: Dégradation chimique des aliments dans le réticulo-rumen: cinétique et importance, in "Nutrition des ruminants domestiques", INRA Ed., 383-404
90. SAUVANT, D., CHAPOUTOT, P., ARCHIMEDE, H., La digestion des amidon par les ruminants et ses conséquences, *INRA Prod. Anim.*, **7(2)**, 115-124
91. SAUVANT, D., 1997, Conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez les ruminants, *INRA Prod. Anim.*, **10(4)**, 287-300

92. SAUVANT, D., 1998, Nutrition glucidique des ruminants, Journées A.F.T.A.A, 12 & 13/05/98
93. STEWART, G.S., 1991, The rumen bacteria, in "Rumen microbial metabolism and ruminal digestion", INRA Ed., 15-26
94. STOCK, R.A., BRINK, D.R., BRINTTON, R.A., GOEDEKEN, F.K., SINDT, M.H., KEIKEMEIER, K.K., BAUER, M.L., and SMITH, K.K., 1987, Feeding combination of high moisture corn and dry-rolled grain sorghum to finishing steers, J. Anim. Sci., **65**: 290-302
95. THERNER, C., BRENT, 1986, Grains processing effects on starch utilization by ruminants, J. Anim. Sci., **63**, 1649-1662.
96. VAN BARNEVELD, SAMANTHA, L., 1999, Chemical and physical characteristics of grains related to variability in energy and amino-acid availability in ruminants: a review. Aust. J. Agric. Res., **50**, 651-665.
97. VAN HOUTERT, M.F.J., 1993, The production and metabolism of volatile fatty acids by ruminants fed roughages: a review, Animal feed science and technology, **43**: 189-225
98. WALHAIN, P., FOUCART, M., THEMIS, A., 1992, Influence of extension on ruminal and intestinal disappearance in sacco of pea proteins and starch, Anim. Feed. Sci. Technol., **38**: 43-55
99. WOLTER, R., 1992, Alimentation de la vache laitière , Ed. La France Agricole

Toulouse, 2001

NOM: CHEVALLIER

PRENOM: Frédéric

TITRE: La digestion ruminale des amidons: cinétique et applications

RESUME:

Après avoir présenté la micropopulation ruminale, la place de l'amidon dans l'alimentation des ruminants, et rappelé les principes de la digestion ruminale, l'auteur a développé les voies de dégradation des glucides. Il a ensuite dressé un bilan des connaissances actuelles sur les aspects cinétiques de la dégradation de l'amidon des principales matières premières. Cela a permis de constater des variations importantes entre les sources d'amidon, qui s'expliquent principalement par la variabilité de la structure de l'endosperme. Il a ensuite montré qu'il était possible de modifier ces vitesses de dégradation ruminale par l'application de traitements mécaniques, physiques ou chimiques, et que des facteurs indépendants de la source d'amidon tels que le niveau d'alimentation ou les autres constituants de la ration influencent aussi la vitesse de dégradation et/ou la dégradabilité ruminale. Cela a conduit à envisager les applications que l'on pouvait tirer de toutes ces données: la partition de la digestion de l'amidon en faveur de la digestion ruminale présente de nombreux avantages jusqu'à des limites qu'il est difficile de ne pas dépasser dans le cas d'animaux nécessitant des rations à densité énergétique très élevée comme les vaches laitières très hautes productrices en début de lactation. L'auteur a alors présenté les moyens actuels de résoudre ce problème, en insistant sur l'importance du mode de distribution des aliments concentrés et en ouvrant des perspectives avec les traitements chimiques.

MOTS-CLES: AMIDON - DIGESTION RUMINALE - CINETIQUE

ENGLISH TITLE: Ruminal digestion of starch: kinetics and applications

ABSTRACT:

After a presentation of the rumen microorganisms, of the place of starch in ruminants' nutrition and a recap of the principles of rumen digestion, the author developed the metabolic pathways of carbohydrates. He then reviewed the current knowledge on the kinetic aspects of starch degradation from the main raw materials. This showed the existence of important differences between the different sources of starch, explained mainly by the variable structure of endosperm. He then explained that it was possible to alter digestion kinetics in rumen by applying mechanical, physical or chemical treatments and that factors independent of the source of starch, such as the level of nutrition or other constituents of the food intake, could influence digestion kinetics and/or degradability in rumen. This led to consider different applications of this knowledge: partition of starch digestion in favour of ruminal digestion presents numerous benefits up to a limit which is difficult not to exceed for animals requiring high energy food intake such as high yield dairy cows at the beginning of lactation. To finish, the author presented the current means to solve this problem, stressing the importance of the type of feed concentrate distribution and evoking the prospects of chemical treatments.

KEY WORDS: STARCH - RUMINAL DIGESTION - KINETICS