



THÈSE
pour obtenir le grade de
Docteur



de

**l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement
(AgroParisTech)**

Spécialité : Sciences animales

*présentée et soutenue publiquement
par*

Marion DESNOYERS

le 23 juin 2008

**INTERET DE L'APPORT DE LEVURES SUR LA SUSCEPTIBILITE A L'ACIDOSE ET LE
COMPORTEMENT ALIMENTAIRE DU RUMINANT**

(APPLICATION A LA CHEVRE LAITIERE)

*Directeur de thèse : **Daniel Sauvart***

*Codirecteur(s) de thèse : **Christine Duvaux-Ponter et Sylvie Giger-Reverdin***

*Travail réalisé à l'UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation
16 rue Claude Bernard 75005 Paris, France*

Devant le jury :

M. René Baumont
M. Henri Brugère
M. Gérard Bertin
Mme Christine Duvaux-Ponter
M. Nicolas Friggens
Mme Sylvie Giger-Reverdin
M. Daniel Sauvart

Directeur de Recherche INRA
Professeur ENVA
Directeur des affaires réglementaires Alltech
Professeur AgroParisTech
Senior Scientist Aarhus Universitet (DK)
Chargé de Recherche INRA
Professeur AgroParisTech

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Président

Invités :

M. Jean-Pierre Jouany
Mme Cécile Martin

Directeur de Recherche INRA
Chargé de Recherche INRA

**Intérêt de l'apport de levures sur la susceptibilité à l'acidose et le
comportement alimentaire du ruminant
(application à la chèvre laitière)**

Mots clés : acidose, levures, *Saccharomyces cerevisiae*, comportement alimentaire,
budget-temps, chèvre laitière

***Yeast supplementation in ruminant:
effects on the susceptibility to acidosis and on feeding behaviour
(application to dairy goats)***

Keywords: acidosis, yeast supplementation, *Saccharomyces cerevisiae*, feeding behaviour,
time-budget, dairy goat

Marion Desnoyers

Travail réalisé

sous la responsabilité scientifique conjointe de

D. Sauvant, C. Duvaux Ponter et S. Giger-Reverdin

UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation

dans le cadre d'un contrat de Recherche Industrie CIFRE

financé par l'Association de la Recherche Technique (ANRT)

et Alltech France

Remerciements

Je remercie M. Gérard Bertin pour le soutien financier apporté à cette étude, M. Henri Brugère et M René Baumont pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail, M. Nicolas Friggens pour avoir accepté de participer à ce jury et les membres du comité de thèse qui ne sont pas spécifiquement cités par la suite : Cécile Martin, Jean-Pierre Jouany et Jean-Marie François.

Un grand merci à mes encadrantes, Christine et Sylvie, pour leur gentillesse, leur patience et leur aide qui ont fait de ces 3 années de thèse, que dis-je... 4 années depuis mon stage de fin d'études, une expérience passionnante et enrichissante. Je les remercie tout particulièrement pour leurs regards critiques et leur traque acharnée des petits détails en tous genres... !

Je remercie Daniel Sauvant, pour son aide très précieuse en statistiques, en modélisation et, plus généralement, en analyse de données. Je n'aurais certainement jamais pu analyser autant de données en si peu de temps sans son aide !

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidée à réaliser ce travail. Je commencerai par la chevrerie en remerciant Gaston, Joseph et Jean pour leur aide précieuse pendant les expériences, mais aussi Alexandra, Anne, Jérôme et Marie pour leur aide, tant technique que psychologique, ainsi que leur amitié et tous les bons moments passés ensemble. Un grand merci aux « parisiennes » pour les analyses : Françoise, Ophélie et Pierrette pour ses talents de couturière. Je remercie également Sabine pour son aide au début de ce travail et Emilie pour le travail réalisé ensemble. Merci également à Isabelle, à qui j'ai fait quitter sa chère Auvergne, pour tous les fous rires pendant les prélèvements...

Ce fut un plaisir de travailler avec vous tous !

Je remercie aussi vivement les chèvres qui ont finalement supporté mes appareils de mesure avec une relative patience... quoique... je ne citerai pas les plus coquines !!

Je n'oublie pas mes « co-stagiaires » et « co-thésards » : Karim, Myriam, Marianne, Cyril, Bérengère, Ihan, Moussa et tous les stagiaires de passage à Grignon, les citer tous serait trop long. Merci à la Zootechnie grignonnaise : Antoine, Ghislaine, Jean-Luc et Pierre et aux habitants de la ferme : Camille, Damien, Nico, et tous les autres pour leur accueil chaleureux.

Mes derniers mots seront pour ma famille, sans qui je ne serais pas là, et pour mon « Berger », que je n'aurais peut-être jamais rencontré sans cette thèse, et pour qui il n'y a pas assez de mots...

Résumé

L'acidose sub-clinique est relativement difficile à diagnostiquer et à prévenir en élevage, car elle est principalement caractérisée par une instabilité des fermentations ruminales et des paramètres zootechniques. Une méta-analyse, réalisée sur 110 publications, a montré que les levures pouvaient réguler les fermentations ruminales, en particulier pour les animaux à fort niveau d'ingestion et recevant un régime riche en concentré.

La distribution d'un régime riche en concentré a entraîné une situation d'acidose sub-clinique ($\text{pH} < 6,25$) entrecoupée par des crises spontanées d'acidose, plus ou moins nombreuses selon les individus, et pouvant influencer la production pendant plusieurs semaines. Les mesures quotidiennes d'ingestion, de production et de pH ruminal ont permis de modéliser la dynamique d'évolution de ces trois paramètres pendant les crises d'acidose, ce qui constitue une première approche vers un modèle plus mécaniste de l'acidose.

De nombreuses mises au point méthodologiques ont été effectuées afin de mesurer simultanément l'ingestion, le pH ruminal et la mastication en continu (pas de temps de l'ordre de la minute) pendant plusieurs semaines. Ces mesures ont permis de présenter une nouvelle méthode d'analyse de l'ingestion par segmentation / classification et de déterminer des types de comportements alimentaires différents, indépendants du régime distribué et plus ou moins stables selon les individus, les crises d'acidose étant caractérisées par un manque d'appétit et une désorganisation de l'ingestion et de la rumination. Ces types de comportements sont associés, pour des quantités ingérées similaires, à des cinétiques de pH très différentes. Cependant, aucune relation n'a été mise en évidence entre le type de comportement alimentaire individuel, et la susceptibilité individuelle des animaux à l'acidose.

La prise en compte des épisodes d'acidose dans les analyses a permis d'éviter les confusions d'effets. L'apport de levures a augmenté la production laitière, sans modifier la matière sèche ingérée, la production de matière grasse ou de protéines du lait. Ceci pourrait résulter de l'augmentation de la proportion de concentré ingérée par les animaux supplémentés, suite à un tri en faveur d'une ration moins fibreuse que celle ingérée par les témoins. La supplémentation a également eu tendance à augmenter la biodiversité de l'écosystème ruminal, ce qui pourrait expliquer que la diminution du pourcentage de fibres ingérées n'a pas induit de baisse du pH ruminal.

Cette étude a montré que les crises d'acidose spontanées ont eu des conséquences importantes sur tous les paramètres étudiés, et souligne l'intérêt de la prise en compte du comportement alimentaire pour mieux comprendre les phénomènes digestifs et métaboliques.

Abstract

Sub-clinical acidosis is poorly detected and is not easily prevented in intensive herds because it is mainly characterized by instability of intake, production and rumen parameters. A meta-analysis performed on 110 papers showed that yeast supplementation can stabilize rumen fermentations, especially in animals with high intake levels and fed high concentrate diets.

Feeding a high concentrate diet led to subclinical acidosis ($\text{pH} < 6.25$), and a variable number of spontaneous bouts of acidosis depending on the goat. These bouts of acidosis could influence milk production during several weeks. Daily measurements of rumen pH, intake and milk production were used to model the day-to-day evolution of these parameters during bouts of acidosis. This model is a first step towards a more mechanistic model of sub-clinical acidosis.

Several methodologies were developed in order to simultaneously and continuously record intake, rumen pH and chewing behaviour (time scale around one minute) during several weeks. These measurements allowed to design a new method to analyse intake kinetics by segmentation / classification and to determine some typical feeding behaviours, observed whatever the offered diet, and more or less stable depending on the goat. These types of feeding behaviours lead to different rumen pH kinetics despite a similar daily intake. Bouts of acidosis were characterized by a very low intake and a diminution in nycthemeral organisation of feeding behaviour. However, no relationship was found between feeding behaviour variability and goat susceptibility to acidosis.

Taking the bouts of acidosis into account for the analyses of yeast supplementation effects allowed to avoid confounding effects. Yeast supplementation increased milk yield without influencing dry matter intake or milk fat and protein production. This might have been due to the higher sorting behaviour performed by supplemented goats which allowed them to eat a less fibrous diet than the one eaten by control goats. Yeast supplementation tended to increase ruminal biodiversity, which might explain the fact that the decrease in the percentage of fibre ingested by supplemented goats compared to control goats did not influence rumen pH.

This study showed that spontaneous bouts of acidosis can lead to many drastic consequences and showed the relevance of analysing feeding behaviour in order to better understand the modifications in digestive or metabolic parameters.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des abréviations	vii
Liste des tableaux et figures	viii
Liste des publications	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE	1
1. Contexte	1
2. Acidose : définition, physiopathologie et régulation	2
2.1. Définition	2
2.2. Périodes à risques	3
2.3. Symptômes	3
2.4. Physiopathologie	4
2.5. Mécanismes de régulation	7
3. Comportement alimentaire et rythme d'activité : définitions et régulations	9
3.1. Comportement alimentaire : définitions	9
3.2. Rythme d'activité	11
3.3. Particularités des chèvres ou des petits ruminants	12
3.4. Variabilité individuelle du comportement alimentaire	13
3.5. Mécanismes de régulation du comportement alimentaire	14
4. Facteurs influençant la susceptibilité des animaux à l'acidose	19
4.1. Composition du régime	19
4.2. Adaptation du comportement alimentaire à la composition du régime	22
4.3. Conduite d'élevage	25
5. Conséquences d'une acidose induite sur le comportement alimentaire	30
5.1. Conséquences sur l'ingestion	30
5.2. Conséquences sur les choix alimentaires	32
6. Prévention de l'acidose	33
6.1. Recommandations pour l'élaboration des rations	34
6.2. Supplémentations	35

7. Méta-analyse : Influence de l'apport de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> sur les paramètres ruminiaux, l'ingestion et la production laitière chez les ruminants	39
8. Objectifs de la thèse	67
8.1. Apport de levures	67
8.2. Acidose sub-clinique	67
8.3. Problématique	68
CHAPITRE 2 : MISES AU POINT METHODOLOGIQUES	69
1. Effet du pourcentage de concentré sur le pH ruminal et le budget-temps de chèvres laitières	70
2. Etude comparée du comportement alimentaire de chèvres laitières en cases individuelles mesuré par enregistrement vidéo ou grâce à un appareil électronique portatif	86
CHAPITRE 3 : MODELISATION DE L'ETAT D'ACIDOSE ET VARIABILITE DU COMPORTEMENT ALIMENTAIRE	103
1. Modélisation des chutes d'ingestion dues à de l'acidose sub-clinique chez des ruminants laitiers en élevage intensif, application aux chèvres	104
2. Variabilité intra- et inter-jours du comportement alimentaire de chèvres laitières en cases individuelles	124
CHAPITRE 4 : INFLUENCE DES LEVURES ET DE L'ACIDOSE SUR LES PARAMETRES ZOOTECHNIQUES ET PHYSIOLOGIQUES	145
1. Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres laitières recevant deux régimes différant par leur pourcentage de concentré. Influence sur les paramètres zootechniques, le pH ruminal et la digestibilité	146
2. Supplémentation en levures vivantes chez des chèvres laitières. Influence sur les paramètres ruminiaux et sanguins	165
CHAPITRE 5 : INFLUENCE DES LEVURES ET DE L'ACIDOSE SUR LE COMPORTEMENT ALIMENTAIRE	182
1. Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres laitières recevant deux régimes différant par leur pourcentage de concentré. Influence sur le budget-temps et le comportement alimentaire	183
2. Une nouvelle méthode d'analyse des cinétiques d'ingestion par segmentation / classification. Application à l'acidose et à la supplémentation en levures	204

CHAPITRE 6 : SURVIE DES LEVURES DANS L'ORGANISME ET INFLUENCE DES LEVURES SUR L'ECOSYSTEME MICROBIEN RUMINAL	221
1. Cinétiques d'apparition, survie et disparition de Yea-Sacc^{®1026} (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>, CBS 493.94, Alltech) dans le rumen et les fèces de chèvres recevant un régime riche en concentré	224
2. Effet d'une supplémentation en levures vivantes sur les activités polysaccharidases dans le rumen de chèvres recevant un régime riche en concentré	225
3. Effet d'une supplémentation en levures vivantes sur la biodiversité bactérienne du rumen de chèvres recevant un régime riche en concentré	234
CHAPITRE 7 : DISCUSSION GENERALE	236
1. Conséquences analytiques du dispositif experimental	236
1.1. Différentes échelles de temps disponibles	236
1.2. Nécessité d'intégrer les crises d'acidose dans les analyses	237
2. Pourcentage de concentré et acidose	239
2.1. Effet du pourcentage de concentré dans le régime	239
2.2. Acidose sub-clinique et crises spontanées d'acidose	241
2.3. Modélisation des épisodes spontanés d'acidose	244
2.4. Conséquences à court terme des crises et régulations associées	245
2.5. Conséquences à moyen et long terme, enjeux et conséquences analytiques	251
3. Apport de levures vivantes	255
3.1. Des résultats variables dans la littérature	255
3.2. Un effet inférieur à celui des crises d'acidose	258
3.3. Un effet par l'intermédiaire du comportement alimentaire ?	259
3.4. Latence et rémanence	260
4. Variabilité individuelle	262
4.1. Comportement alimentaire	262
4.2. Susceptibilité des animaux à l'acidose	266
CONCLUSION	268
Références bibliographiques	270
Annexe 1 : Contraintes méthodologiques et conséquences analytiques	284
Annexe 2 : Ethogramme utilisé pour l'analyse du budget-temps	290
Annexe 3 : Analyse individuelle du comportement alimentaire	291
Annexe 4 : Expérience réalisée en 2005	297

Liste des abréviations

Abréviation		Signification
Français	Anglais	
	ADF	Acid Detergent Fiber (Van Soest)
	ADL	Acid Detergent Lignin (Van Soest)
AGNE	NEFA	Acides Gras Non Estérifiés/ Non Esterified Fatty Acids
AGV	VFA	Acides Gras Volatils / Volatile Fatty Acids
BE	EB	Bilan Energétique / Energy Balance
	BHB	BétaHydroxyButyrate
	C2/C3	Rapport acétate sur propionate (ruminal)
MO	OM	Matière Organique / Organic Matter
MS	DM	Matière Sèche / Dry Matter
MSI	DMI	Matière Sèche Ingérée / Dry Matter Intake
MSIPV	DMIBW	MSI par kg de poids vif/ DMI per kg Body Weight
	NDF	Neutral Detergent Fiber (Van Soest)
PDI	-	Protéines Digestibles dans l'Intestin
PLB	RMY	Production laitière brute/ Raw milk yield
PLC	FCM	Production Laitière Corrigée / Fat Corrected Milk
PV	BW	Poids vif / Body Weight
	TMR	Total mixed ration (ration complète)
TB	MFC	Taux Butyreux / Milk Fat Content
TP	MPC	Taux Protéique / Milk Protein Content
UFC	CFU	Unités Formant Colonie / Colony Forming Unit
UFL	-	Unité Fourragère Lait = 1 700 kcal = 7 115 kJ

Liste des tableaux et figures

Figures présentées en introduction et discussion générales

Figure 1. Mécanisme simplifié des acidoses sub-clinique et aiguë. 4

Figure 2. Relations entre les six paramètres définissant l'ingestion. 11

Tableaux présentés en introduction et discussion générales

Tableau 1. Durées d'ingestion, de rumination et de mastication de chèvres selon le rapport fourrage/concentré (F/C) de la ration (min/jour). 22

Tableau 2. Occurrence des jours de début des crises d'acidose, période et intensité pour les 18 chèvres de l'expérience des chapitres 3, 4, 5 et 6 recevant des levures (Y) ou témoins (C) 267

Liste des publications

Revue à comité de lecture

Giger-Reverdin, S., Desnoyers, M., Duvaux-Ponter, C. et Sauvant, D. 2006. Rumen and metabolic acidosis in dairy goats are independent. *J. Anim. Sci. JAS* 84 Suppl.1, *JDS* 89 (Suppl. 1): 215.

Desnoyers, M., Martin, C., Duvaux-Ponter, C., Morgavi, D. P., Jouany, J.-P., Sauvant, D., Bertin, G. et Giger-Reverdin, S. (*accepté*). Effect of live yeast supplementation on ruminal polysaccharidase activities in goats fed a high concentrate diet. *Options mediterr., Ser. A*

Giger-Reverdin, S., Desnoyers, M., Rigalma, K., Morand-Fehr, P., Sauvant, D., Tessier, J., Dhumez, O., Duvaux-Ponter, C. (*accepté*). Behavioral strategies of dairy goats fed an acidogenic diet. *Options mediterr., Ser. A*

Desnoyers, M., Morgavi, D.P., Giger-Reverdin, S., Bertin, G., Jouany, J.-P., Martin, C. (*accepté*). Effect of live yeasts on rumen bacterial diversity in lactating goats fed a high concentrate diet. *Proceedings of the Nutrition Society*.

Desnoyers, M., Duvaux-Ponter, C., Rigalma, K., Roussel, S., Martin, O. et Giger-Reverdin, S. (*accepté*). Effect of concentrate percentage on ruminal pH and time-budget in dairy goats. *Animal*

Desnoyers, M., Béchet, G., Duvaux-Ponter, C., Morand-Fehr, P. et Giger-Reverdin, S. (*soumis*). Comparison of video and a pneumatic method for measuring chewing behaviour in dairy goats in individual pens. *Small Rumin. Res.*

Desnoyers, M., Giger-Reverdin, S., Bertin, G., Duvaux-Ponter, C. et Sauvant, D. (*soumis*). Meta-analysis of the influence of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on ruminal parameters and milk production of ruminants. *J. Dairy Sci.*

Desnoyers, M., Giger-Reverdin, S., Duvaux-Ponter, C. et Sauvant, D. (*Soumis*). Modeling of off-feed periods due to subacute acidosis in intensive lactating ruminants, application to goats. *J. Dairy Sci.*

Desnoyers, M., Duvaux-Ponter, C., Sauvant, D., Bertin, G. et Giger-Reverdin, S. (*Soumis*). Live yeast supplementation and acidosis in dairy goats receiving two diets differing by their percentage of concentrate. Influence on intake, production, ruminal pH and digestibility. *Animal*

Desnoyers, M., Giger-Reverdin, S., Sauvant, D., Bertin, G. et Duvaux-Ponter, C. (*Soumis*). Live yeast supplementation and acidosis in dairy goats receiving two diets differing by their percentage of concentrate. Influence on time-budget and feeding behaviour. *Appl. Anim. Behav. Sci.*

Posters présentés à des conférences avec comité de lecture

Desnoyers, M., Duvaux-Ponter, C., Bertin, G., Roussel, S., Tessier, J., Piquerel, P. et Giger-Reverdin, S. 2006. Effets de l'apport de levures (*Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94) sur le comportement et la réactivité émotionnelle de chèvres laitières en acidose sub-clinique. 13^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France, 2006/12/06-07. INRA - Institut de l'Elevage. 137.

Desnoyers, M., Giger-Reverdin, S., Duvaux-Ponter, C. et Bertin, G. 2007. Kinetics of appearance, disappearance and survival of Yea-Sacc^{®1026} (*Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) in the rumen and feces of dairy goats fed a high concentrate diet. Alltech's 23rd annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, Kentucky, USA, May 20-23 2007. 60.

Desnoyers, M., Martin, C., Duvaux-Ponter, C., Morgavi, D. P., Jouany, J.-P., Sauvant, D., Bertin, G. et Giger-Reverdin, S. 2007. Effect of a live yeast supplementation on ruminal polysaccharidase activities in goats fed a high concentrate diet. Nutritional and foraging ecology of sheep and goats. 12th Seminar of the FAO-CIHEAM Sub-Network on Sheep and goat Nutrition, Thessaloniki, Greece, 2007/10/11-13. FAO, NAGREF, CIHEAM. 61.

Desnoyers, M., Morgavi, D. P., Giger-Reverdin, S., Bertin, G., Jouany, J.-P. et Martin, C. 2008. Effect of live yeasts on rumen bacterial diversity in lactating goats fed a high concentrate diet. 6th symposium INRA-RRI. GUT MICROBIOME: Functionality, interaction with the host and impact on the environment, Clermont-Ferrand, France, 18-20 juin 2008. A paraître dans Proceedings of the Nutrition Society.

Giger-Reverdin, S., Desnoyers, M. et Sauvant, D. 2005. Etude de la variabilité individuelle de chèvres laitières à des régimes plus ou moins acidogènes. 12^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France, 2005/12/07-08. INRA - Institut de l'Elevage. 252.

Giger-Reverdin, S., Duvaux-Ponter, C., Desnoyers, M., Tessier, J., Ternois, F. et Sauvant, D. 2006. Capacité physiologique du ruminant à tamponner les effets de l'alimentation. 13^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France, 2006/12/06-07. INRA - Institut de l'Elevage.

Giger-Reverdin, S., Desnoyers, M., Rigalma, K., Morand-Fehr, P., Sauvant, D., Tessier, J., Dhumez, O. et Duvaux-Ponter, C. 2007. Behavioral strategies of dairy goats fed an acidogenic diet. Nutritional and foraging ecology of sheep and goats. 12th Seminar of the FAO-CIHEAM Sub-Network on Sheep and goat Nutrition, Thessaloniki, Greece, 2007/10/11-13. FAO, NAGREF, CIHEAM. 14.

Posters présentés à des conférences sans comité de lecture

Desnoyers, M., Duvaux-Ponter, C., Roussel, S., Bertin, G., Tessier, J. et Giger-Reverdin, S. 2006. Intérêt de l'apport d'une levure (*Saccharomyces cerevisiae*, CBS 494.94) sur la susceptibilité à l'acidose et sur le bien-être de la chèvre laitière. 3^{ème} journée scientifique interdisciplinaire de l'INA P-G, 2006/05/29. 17.

Giger-Reverdin, S., Duvaux-Ponter, C., Desnoyers, M., Tessier, J., Ternois, F. et Sauvant, D. 2006. Quelques exemples de la capacité physiologique du ruminant à tamponner les effets de l'alimentation. 3^{ème} journée scientifique interdisciplinaire de l'INA P-G, 2006/05/29. 24.

CHAPITRE 1

Introduction générale

Chapitre 1 : Introduction générale

1. CONTEXTE

Des chutes d'ingestion et de l'acidose ont été observées depuis longtemps dans les élevages intensifs de ruminants (Uhart et Carroll, 1967 ; Tremere *et al.*, 1968). L'acidose ruminale résulte le plus souvent de la distribution d'aliments concentrés riches en énergie (à dégradation généralement rapide) à des animaux fondamentalement adaptés à valoriser des fourrages (à dégradation plus lente). Elle affecte à la fois la digestion et la santé des animaux. Elle est donc très souvent rencontrée chez les animaux à haut potentiel de production recevant des rations riches en concentré afin de satisfaire leurs besoins énergétiques élevés (Kleen *et al.*, 2003 ; Sauvant *et al.*, 2006). Même si les animaux laitiers reçoivent des rations généralement plus riches en fibres que les animaux à l'engraissement, le risque d'acidose est équivalent, car les quantités ingérées sont plus importantes pour les premiers que pour les seconds (Krause et Oetzel, 2006). De plus, Sauvant *et al.* (1999) ont montré que le maintien d'un pH ruminal élevé maximisait la production de matière grasse dans le lait. Or, c'est la maximisation de la production de protéines qui est actuellement valorisée par la filière laitière, ce qui n'est possible qu'avec des pH ruminiaux relativement bas, et donc des risques importants d'acidose (Savant *et al.*, 1999).

Les effets bénéfiques des rations riches en concentré, sur les volumes de lait produits, sont donc souvent contrebalancés par des conséquences négatives sur la santé des animaux (Krause et Oetzel, 2006). Selon une étude réalisée aux Etats-Unis sur 15 troupeaux laitiers, 19 % des animaux en début de lactation et 26 % des animaux en milieu de lactation seraient touchés par l'acidose, et dans un tiers des troupeaux, plus de 40 % des animaux seraient atteints (Kleen *et al.*, 2003). Aux Etats-Unis, la perte économique liée à l'acidose a été estimée entre 400 et 475 \$ US par vache et par an (Krause et Oetzel, 2006). Ces valeurs sont certainement moins importantes en Europe de par la plus faible proportion d'élevages très intensifs, mais elles ne sont sans doute pas négligeables. L'acidose est également un problème majeur en élevage caprin intensif.

L'ajout de compléments alimentaires aux rations afin de maximiser la production et d'améliorer la santé des animaux d'élevage est de plus en plus pratiqué actuellement. L'acidose étant due à une déviation des fermentations de l'écosystème ruminal, l'apport de levures vivantes pourrait aider l'écosystème ruminal à faire face à de telles situations.

2. ACIDOSE : DEFINITION, PHYSIOPATHOLOGIE ET REGULATION

2.1. Définition

L'acidose est la manifestation d'une mauvaise adaptation du ruminant à l'ingestion d'aliments riches en concentré (Uhart et Carroll, 1967 ; Tremere *et al.*, 1968 ; Kleen *et al.*, 2003), car ce sont des animaux physiologiquement adaptés à la valorisation de fourrages, aliments fibreux, et non d'aliments concentrés, généralement pauvres en fibres. Deux types d'acidose peuvent être distingués (Owens *et al.*, 1998) : l'**acidose aiguë** (grave et parfois mortelle) et l'**acidose sub-clinique** (ou chronique, ou latente, aussi désignée sous le sigle de SARA : SubAcute Ruminal Acidosis), qui semble toucher les animaux de manière plus subtile, et qui est la plus difficile à diagnostiquer en élevage. Elle est aussi plus répandue et ne concerne souvent qu'un petit nombre d'animaux d'un troupeau de façon irrégulière et non simultanée (Bouisset, 1998).

L'acidose aiguë correspond à une chute importante et prolongée du pH ruminal (Oetzel, 2000) jusqu'à des valeurs inférieures à 5,0. Elle correspond à un état de perturbation extrême de l'organisme, et se caractérise par des bouleversements importants du milieu ruminal conduisant à diverses complications et souvent à la mort de l'animal (Elam, 1976 ; Martin *et al.*, 2006).

L'acidose sub-clinique est plus difficile à caractériser, si ce n'est par son instabilité (Martin *et al.*, 2006). Elle est définie par des périodes de baisse du pH relativement courtes et modérées (Oetzel, 2000), mais qui peuvent se répéter plus ou moins fréquemment. Les critères de détermination sont soit le pH ruminal moyen, compris entre 5,50 et 6,25 pour l'acidose sub-clinique (Sauvant *et al.*, 2004), soit la valeur minimale qui peut être comprise entre 5,0 et 5,5 (Bauer *et al.*, 1995) ou inférieure à 6,0 (Krehbiel *et al.*, 1995b). En effet, le temps passé sous des pH de 6,0 modifie la composition de la flore ruminale au détriment des bactéries cellulolytiques (Prins et Clarke, 1980), et la valeur de 5,5 correspond au seuil à partir duquel une chute d'appétit apparaît (Fulton *et al.*, 1979 ; Oetzel, 2003b). Devant les difficultés rencontrées pour caractériser l'acidose sub-clinique, le temps et l'aire sous des pH seuils de 5,5 ou 6,0 sont de plus en plus utilisés (Maekawa *et al.*, 2002b ; Beauchemin *et al.*, 2003). Cependant, Sauvant *et al.* (1999) et Dragomir *et al.* (2008) ont montré que la durée pendant laquelle le pH est inférieur à 6,0 était fortement corrélée au pH moyen, mais qu'elle pouvait également être très variable à pH moyen égal. Un pH moyen ruminal de 6,25, ce qui correspondrait à environ 4 h sous un pH de 6,0, a été proposé comme seuil de détermination

de l'acidose sub-clinique (Sauvant *et al.*, 1999). La concentration ruminale en acide lactique pourrait également être un moyen de distinguer les acidoses aiguës des acidoses sub-cliniques (Bauer *et al.*, 1995 ; Oetzel, 2000 ; Krause et Oetzel, 2006). Des valeurs fortes (> 40 mmol / l au pic) de concentration en acide lactique ont en effet été associées à des acidoses aiguës, et des valeurs faibles (< 3 mmol / l), à des acidoses sub-cliniques (Harmon *et al.*, 1985).

2.2. Périodes à risques

Dans les systèmes d'élevages intensifs, les ruminants sont soumis à des rythmes de production très soutenus, et le rumen est souvent contraint à des adaptations rapides et intenses, ce qui augmente le risque d'acidose.

Les principales situations à risque sont les transitions alimentaires faisant intervenir de profonds changements quantitatifs et qualitatifs de la ration. Ces situations sont rencontrées autour du vêlage pour les ruminants laitiers forts producteurs, et lors du démarrage des jeunes ruminants à l'engraissement (Uhart et Carroll, 1967 ; Tremere *et al.*, 1968 ; Martin *et al.*, 2006). Les animaux laitiers passent, en effet, rapidement d'un régime de gestation, relativement pauvre en énergie et riche en fibres, à un régime de production, riche en énergie et donc, plus pauvre en fibres (Tremere *et al.*, 1968 ; Kleen *et al.*, 2003). Cette période comprenant les quelques semaines avant et après la mise-bas est très importante pour la production future de l'animal (Jouany, 2006). L'adaptation de la muqueuse ruminale à un régime riche en concentré prend entre quatre et six semaines, tandis que l'adaptation des micro-organismes prend environ trois semaines (Kleen *et al.*, 2003). L'acidose sub-clinique peut cependant être observée en dehors de ces périodes chez des animaux en production recevant des rations hautement énergétiques. Ces rations entraînent des fermentations ruminales à la limite de l'équilibre physiologique (Martin *et al.*, 2006), et la moindre perturbation peut entraîner un déséquilibre, et donc, une acidose.

2.3. Symptômes

L'un des premiers symptômes de l'acidose est la baisse d'ingestion, qui peut aller jusqu'à l'anorexie en cas d'acidose aiguë (Uhart et Carroll, 1967 ; Kezar et Church, 1979 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999 ; Brown *et al.*, 2000). Dans les cas d'acidose sub-clinique, il s'agit plutôt de baisse (Owens *et al.*, 1998 ; Oetzel, 2000), d'irrégularité (Nocek, 1997 ; Owens *et al.*, 1998 ; Oetzel, 2000 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006), voire de pseudo cyclicité de l'ingestion

(Brugère, 2003). La production laitière et le taux butyreux du lait sont également diminués chez les animaux laitiers (Kawas *et al.*, 1991 ; Bouisset, 1998 ; Oetzel, 2000 ; Brugère, 2003 ; Sauvart *et al.*, 2004 ; Martin *et al.*, 2006). Sauvart *et al.* (1999) ont, en effet, montré que le maintien d'un pH ruminal élevé maximisait la production de matière grasse dans le lait, mais pas celle de protéine, qui est supérieure pour des pH ruminiaux inférieurs. Les états d'acidose sub-clinique sont donc associés à un faible taux butyreux. Enfin, l'acidose sub-clinique a souvent été associée à des notes d'état corporel faibles, mais pourrait également être associée à un phénomène d'engraissement important, en particulier pour les animaux taris ou en fin de lactation (Kleen *et al.*, 2003). Les conséquences de l'acidose sub-clinique sur l'état corporel des animaux semblent donc être variées selon le stade physiologique de l'animal et ses besoins.

D'autres troubles, tels que de faibles performances de reproduction, des boiteries (Kleen *et al.*, 2003), des diarrhées plus ou moins importantes (Uhart et Carroll, 1967 ; Kezar et Church, 1979 ; Patra *et al.*, 1996 ; Owens *et al.*, 1998 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999 ; Oetzel, 2003a ; Krause et Oetzel, 2006), et une augmentation de la fréquence cardiaque et respiratoire (Huber, 1976 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999 ; Martin *et al.*, 2006) peuvent être observés, mais tous ces symptômes peuvent aussi avoir de nombreuses autres causes. Selon Oetzel (2000), les signes cliniques de l'acidose peuvent être décalés de plusieurs semaines par rapport à la chute initiale du pH ruminal.

2.4. Physiopathologie

La figure 1 présente les mécanismes simplifiés de l'acidose sub-clinique et aiguë.

2.4.1. Acidose ruminale

Acidose sub-clinique. Dans les conditions optimales de fonctionnement, le pH ruminal se situe entre 6,0 et 6,8. L'arrivée de glucides rapidement fermentescibles dans le rumen entraîne une brusque diminution du pH suite à une production accrue d'acides gras volatils (**AGV** : acide acétique ou C2, propionique ou C3 et butyrique ou C4). Ces phénomènes s'accompagnent d'une diminution de l'acétate, généralement au profit du propionate (Uhart et Carroll, 1967 ; Fulton *et al.*, 1979), mais aussi du butyrate (Brossard *et al.*, 2004), ou des deux simultanément (Coe *et al.*, 1999). Dans tous les cas, le rapport acétate sur propionate (**C2/C3**) chute dès le début de l'état d'acidose, et avant même que le pH n'ait atteint les valeurs de 5,5 ou 6,0 généralement prises en compte dans la détermination de l'acidose.

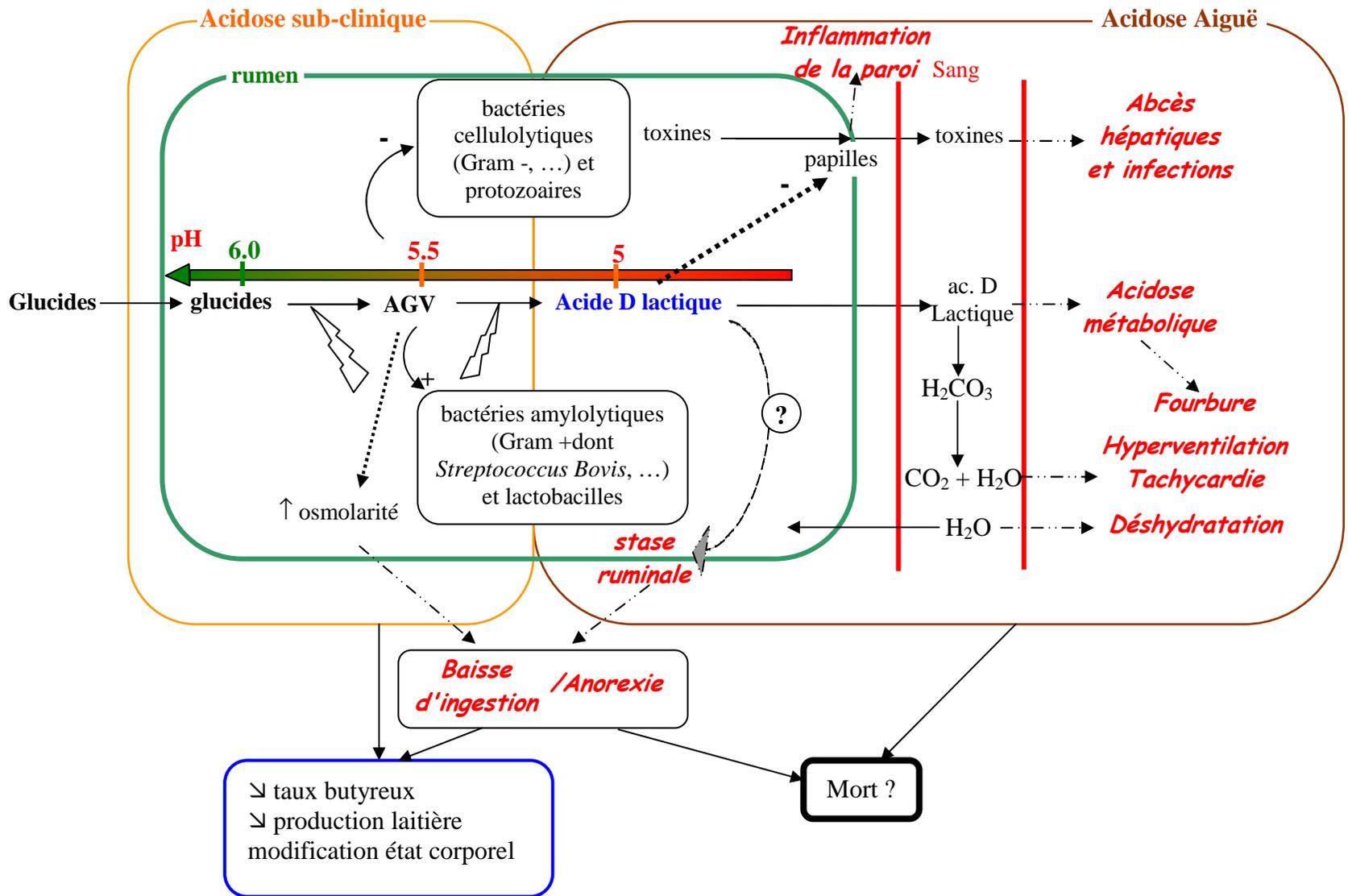


Figure 1. Mécanisme simplifié des acidoses sub-clinique et aiguë.

Ce ratio doit être maintenu dans un rapport de 3/1 pour un fonctionnement normal du rumen (Kaufmann, 1976 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006). Même si l'acidose sub-clinique est généralement associée à des notes d'état corporel faibles, il semble qu'un faible rapport C2/C3 serait responsable du phénomène d'engraissement important déjà évoqué (fat-cow syndrome) (Kleen *et al.*, 2003). Il est parallèlement responsable de la baisse du taux butyreux du lait (milk fat depression) (Kleen *et al.*, 2003). Les proportions des différents AGV peuvent également varier d'un jour à l'autre pour des animaux recevant un régime acidogène, ce qui est probablement le reflet de l'instabilité des fermentations ruminales caractéristiques des états acidotiques (Martin *et al.*, 2006). Il a toutefois été suggéré que les fermentations ruminales s'orienteraient tout d'abord vers le butyrate, puis vers le propionate au fur et à mesure que le pH ruminal diminue (Martin *et al.*, 2006). La pression osmotique et la viscosité du contenu ruminal sont également modifiées lors d'une acidose ruminale (Elam, 1976 ; Kezar et Church, 1979 ; Brown *et al.*, 2000 ; Martin *et al.*, 2006), ce qui semble être un des facteurs entraînant la baisse d'ingestion observée (Krause et Oetzel, 2006).

Acidose aiguë. Le seuil de pH 5,0 est généralement considéré comme seuil d'irréversibilité de l'acidose aiguë si l'animal continue à ingérer des glucides rapidement fermentescibles (Martin *et al.*, 2006). A des pH aussi faibles, on observe une diminution très forte de la concentration totale en AGV (de 40 à 80 %), et une accumulation du lactate qui n'était pas observée dans les cas d'acidose sub-clinique (Tremere *et al.*, 1968 ; Krehbiel *et al.*, 1995a ; Martin *et al.*, 2006). Cette diminution de la concentration en AGV peut être due à une synthèse microbienne inférieure, et/ou un plus grand taux d'absorption des AGV du rumen vers le sang consécutif à la baisse du pH ruminal (Dijkstra *et al.*, 1993). En effet, l'absorption des AGV est d'autant plus importante que le pH diminue, car leur degré de dissociation en ions diminue avec le pH et leur absorption est facilitée sous forme non ionique (Dijkstra *et al.*, 1993 ; Krause et Oetzel, 2006). Le lactate est un acide plus fort que les AGV, car les pKa sont respectivement aux alentours de 4,8 pour les AGV et de 3,9 pour le lactate, et son accumulation explique la baisse importante du pH à des valeurs inférieures à 5,0.

Modification de la flore microbienne ruminale. Parallèlement à ces bouleversements des fermentations ruminales, la flore microbienne est modifiée dans le sens d'une diminution de la diversité microbienne. La population de protozoaires est fortement altérée à des pH inférieurs à 5,0 (Elam, 1976 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999). La population totale des bactéries est également fortement diminuée (Martin *et al.*, 2006), et les consommateurs de lactate

(*Selenomonas ruminantium* et *Megasphaera elsdenii*) disparaissent au profit des producteurs de cette molécule (*Streptococcus bovis*, lactobacilles...) (Martin *et al.*, 2006). Ainsi, lorsque le pH ruminal atteint des valeurs inférieures à 5,5, *Streptococcus bovis* se met à produire du lactate à la place des AGV (Bouisset, 1998 ; Brugère, 2003 ; Krause et Oetzel, 2006), accentuant ainsi la baisse de pH jusqu'à ce que seuls les lactobacilles résistent (pH = 5,2), et continuent à synthétiser de l'acide lactique (Bouisset, 1998 ; Martin *et al.*, 2006). La population ruminale peut alors quasiment se réduire à une monoculture de lactobacilles, et cet état peut être atteint en seulement 4 à 24 h après une ingestion massive de glucides rapidement fermentescibles (Kezar et Church, 1979).

2.4.2. Acidose métabolique et effets létaux sur l'organisme

Si les perturbations initiales dues à l'acidose sont d'ordre digestif, elles peuvent s'étendre à tout l'organisme et engendrer des complications infectieuses et locomotrices (Nocek, 1997 ; Martin *et al.*, 2006).

L'acidose métabolique (baisse du pH sanguin) n'est pas systématiquement observée dans les cas d'acidose sub-clinique, mais est souvent une complication de l'acidose ruminale aiguë (Martin *et al.*, 2006). Elle résulte à la fois d'un effet lié à la production importante d'acides dans le rumen, mais sans doute aussi de l'activité métabolique intense des animaux. Le métabolisme cellulaire est en effet une source de protons par l'intermédiaire de la production d'acides cétoniques, lactique et surtout carbonique, terme ultime du métabolisme (Peyraud et Apper-Bossard, 2006). Dans les cas d'acidose métabolique, la teneur en lactate sanguin augmente proportionnellement à celle du lactate ruminal (Krehbiel *et al.*, 1995a). Ce lactate est issu non seulement du lactate ruminal, mais également du métabolisme du propionate par la paroi ruminale, de la transformation du glucose par la paroi intestinale, et du lactate produit dans les tissus périphériques (Martin *et al.*, 2006). Cette augmentation du lactate entraîne une diminution du pH et une augmentation du CO₂ sanguin, qui entraîne, à son tour, une augmentation de la fréquence et de l'amplitude respiratoire (Bouisset, 1998 ; Martin *et al.*, 2006).

La première complication d'une acidose aiguë est une perturbation, voire un arrêt, de la motricité ruminale (Elam, 1976 ; Kezar et Church, 1979 ; Patra *et al.*, 1996 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999 ; Brugère, 2003), généralement liée à une chute d'appétit. Les cellules épithéliales du rumen n'étant pas protégées par du mucus, elles sont sujettes à une dégradation par les acides, et il s'ensuit une inflammation de la paroi du rumen appelée ruminite (Brugère, 2003 ;

Oetzel, 2003b ; Krause et Oetzel, 2006). Suite à l'augmentation de la pression osmotique, les flux du plasma et du liquide interstitiel vers le rumen augmentent, ce qui entraîne une destruction physique de l'épithélium, ainsi qu'une augmentation de la perméabilité des parois aux produits toxiques et aux agents pathogènes (Bouisset, 1998 ; Martin *et al.*, 2006). Même si ces modifications sont réversibles, elles peuvent altérer la capacité d'absorption des produits fermentaires pendant plusieurs mois (Krehbiel *et al.*, 1995a). L'arrivée d'acide lactique, de microorganismes et de toxines dans le sang a ensuite de nombreuses conséquences d'ordre locomoteur (fourbures) ou infectieux à tous les niveaux de l'organisme (foie, puis poumons, cœur, reins, articulations), principalement observées sous forme d'abcès (Krehbiel *et al.*, 1995a ; Bouisset, 1998 ; Krause *et al.*, 2002 ; Kleen *et al.*, 2003 ; Oetzel, 2003b). Tout ceci peut conduire, relativement rapidement, à la mort de l'animal.

2.5. Mécanismes de régulation

Il existe de très nombreux systèmes de régulation des paramètres ruminiaux et seuls les principaux impliqués dans le contrôle de l'acidose sont présentés ici.

Les différents systèmes tampons de la phase liquide ruminale sont les sels d'AGV, les bicarbonates et les phosphates (Martin *et al.*, 2006). Les bicarbonates ont un rôle très important, car la valeur de leur pKa (6,25) est proche des valeurs physiologiques « normales » du pH du rumen. Ils sont apportés en continu par la salive. Chez les vaches laitières, l'apport salivaire serait de 20 à 70 ml / min au repos, il augmenterait pendant l'ingestion jusqu'à 150 à 200 ml / min pour atteindre 200 à 300 ml / min pendant la rumination (Bouisset, 1998). Certains auteurs ont, de plus, observé une augmentation progressive de la quantité de salive sécrétée jusqu'à 430 ml / min au cours de l'ingestion chez des vaches laitières (Dulphy et Faverdin, 1987). Ainsi, environ 150 litres de salive sont produits par jour par un bovin adulte, et 10 litres par un ovin (Jarrige, 1988). La salive, d'un pH d'environ 8,2 (Jarrige, 1988) à 8,6 (Dulphy et Faverdin, 1987) pour les ruminants, est particulièrement riche en sodium, potassium, bicarbonates (120 mEq / l = 11,4 g/l) et phosphates (25 mEq / l) (Krause et Oetzel, 2006 ; Sauvart *et al.*, 2006). Ainsi, l'apport salivaire représente environ la moitié des bicarbonates entrant dans le rumen (Owens *et al.*, 1998). Ces tampons se retrouvent, au niveau ruminal, à des teneurs de l'ordre de 15 à 25 mEq / l pour les phosphates et 5 à 60 mEq / l pour les bicarbonates (Rémond *et al.*, 1995). La quantité de salive produite est totalement indépendante du pH ruminal, et dépend essentiellement du temps passé à

mastiquer (Maekawa *et al.*, 2002b). Le recyclage des tampons salivaire s'accroît donc avec les rations riches en fibres (Peyraud et Apper-Bossard, 2006).

Ce système tampon représente la principale forme de régulation du pH ruminal, mais d'autres processus peuvent également limiter l'accumulation d'AGV postprandiale. Ainsi, l'amidon peut être stocké par les protozoaires au cours des repas, ce qui peut retarder son processus de fermentation de plusieurs heures (Jouany et Thivend, 1972). L'absorption des AGV, d'autant plus rapide que le pH diminue, permet également de réguler la quantité d'acide présente dans le rumen (Dijkstra *et al.*, 1993 ; Krause et Oetzel, 2006). La longueur des chaînes carbonées des AGV augmente également lorsque le pH diminue, ce qui permet de stocker une quantité plus importante de carbone dans le rumen en minimisant les variations de pH, et pourrait expliquer, en partie, la chute de C2 au profit des AGV à chaîne plus longue (Sauvant et Van Milgen, 1995 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006). Cependant, ces mécanismes ne sont plus efficaces lorsque le pH ruminal diminue trop rapidement, ce qui conduit aux états acidosiques décrits ci-dessus.

L'apport de rations riches en concentré induit des fermentations ruminales à la limite de l'équilibre physiologique, et la moindre perturbation peut entraîner un déséquilibre vers l'acidification du milieu. L'acidose sub-clinique se traduit par un déséquilibre ponctuel et répété des fermentations ruminales. Cet état est généralement réversible et contrôlé par les mécanismes naturels de régulation. L'acidose aiguë correspond à une aggravation de l'acidose sub-clinique lorsque les déviations fermentaires dépassent le seuil physiologique de régulation. Elle peut conduire à la mort de l'animal.

Quel que soit le type d'acidose, ses principales causes semblent être une mauvaise adaptation du rumen au régime, et l'ingestion trop rapide, ou en trop grande quantité, de glucides rapidement fermentescibles.

3. COMPORTEMENT ALIMENTAIRE ET RYTHME D'ACTIVITE : DEFINITIONS ET REGULATIONS

3.1. Comportement alimentaire : définitions

Le **comportement alimentaire** peut se définir comme « l'ensemble des actions de l'animal ayant pour finalité la recherche, le choix des aliments, et leur ingestion en quantité adaptée à la satisfaction des besoins en énergie et en nutriments de l'organisme » (Jean-Blain, 2002). Les phases de recherche et de choix des aliments sont actuellement peu importantes pour nos animaux d'élevage, mais de nombreux facteurs, liés à l'aliment comme à l'animal, peuvent être susceptibles de modifier le comportement alimentaire et l'ingestion, et donc, les performances de l'animal (Coléou, 1984 ; Jean-Blain, 2002).

Les ruminants passent de 3 à 12 h par jour à ingérer leurs aliments (Dulphy et Faverdin, 1987). L'ingestion est divisée en **repas**. Un repas peut être défini par trois caractéristiques : sa *taille minimale* (g), la *durée maximale* (min) accordée pour son ingestion, ainsi que l'*intervalle minimal* (min) nécessaire pour considérer deux repas indépendants (Heinrichs et Conrad, 1987). Ces critères sont à adapter selon l'espèce, l'âge et le stade physiologique, et tous les épisodes d'ingestion qui ne rentrent pas dans ces critères sont considérés comme du grignotage (Heinrichs et Conrad, 1987). Il est possible de différencier deux types de repas. Le **repas principal** est caractérisé par sa longue durée et se situe juste après la distribution de nourriture pour les animaux alimentés à l'auge (Abijaoudé, 1999). Les **repas secondaires** sont moins importants et sont intercalés entre les repas principaux (Abijaoudé, 1999). Ces deux types de repas sont cependant difficiles à caractériser, et les définitions restent variables selon les auteurs. Pour des chèvres, Abijaoudé *et al.* (2000c) ont déterminé la fin d'un repas principal par au moins 20 min de repos masticatoire. Dans le cas de vaches laitières, Heinrichs et Conrad (1987) ont utilisé comme critères, pour atteindre 90 à 95 % de l'ingestion au cours des repas principaux, une quantité minimale de 0,2 kg ingérés, une durée minimale de 2,5 min ainsi qu'un intervalle minimal de 8 min entre deux repas. La vitesse d'ingestion diminue au cours des repas principaux (Dukworth et Shirlaw, 1958 cités par Jarrige *et al.*, 1995), et la cinétique d'ingestion cumulée peut généralement être décrite en fonction du temps (t) écoulé depuis le début du repas par un modèle exponentiel $MSI = K (1 - \exp^{-bt})$, dans lequel b représente une constante de rassasiement (Jarrige *et al.*, 1995). La vitesse d'ingestion théorique est ainsi 4 à 5 fois plus élevée au début qu'à la fin du repas chez des vaches en

lactation consommant de l'ensilage de maïs, et 3 à 6 fois plus élevée au début qu'à la fin du repas chez des moutons à l'entretien. La fréquence masticatoire demeurant à peu près constante au cours du repas, cette diminution de la vitesse d'ingestion résulte de deux phénomènes : une diminution de la fréquence de déglutition des bols alimentaires qui sont mastiqués de plus en plus longuement, et l'apparition de plus en plus fréquente de brèves interruptions de l'activité masticatoire (Jarrige *et al.*, 1995).

L'**ingestion** peut être décrite par six paramètres (Figure 2, d'après Nielsen, 1999). Trois d'entre eux sont définis par la structure des repas : la *fréquence* des repas (nombre/jour), leur *durée* (min/repas), et leur *taille* (g/repas). Ces trois paramètres permettent de définir l'ingestion par trois autres paramètres : la *quantité ingérée* par jour (g/jour, fréquence * taille), la *vitesse d'ingestion* (g/min, taille / durée) et la *durée d'ingestion* (min/jour, fréquence * durée) (Nielsen, 1999).

La **rumination** est constituée de cycles d'une durée légèrement inférieure à une minute (Jarrige, 1988). La durée des périodes de rumination, ainsi que l'intervalle de temps séparant deux périodes consécutives, sont rarement inférieurs à 20 min (Dulphy et Faverdin, 1987). Le nombre de périodes de rumination réalisées par jour est compris entre 10 et 17 pour une alimentation à base de fourrages (Dulphy et Faverdin, 1987). La rumination peut être caractérisée par le *nombre* et la *durée* des périodes et des bols de rumination, mais aussi par le nombre de mouvements masticatoires qu'elle entraîne (Abijaoudé *et al.*, 2000c). La durée du cycle mérycique s'allonge progressivement après le grand repas du soir jusqu'à atteindre, après minuit, un maximum qui s'élève à 64 secondes chez les vaches en lactation au lieu de 55 pendant la journée (Kerbaa 1969 cité par Jarrige *et al.*, 1995). Cela est sans doute lié à une perte de vigilance de l'animal, car la durée du cycle augmente environ de moitié quand l'animal s'endort au cours d'une période de rumination, alors que les mouvements de mâchoire se poursuivent au même rythme et occupent la même proportion du cycle (Ruckebush et Buéno, 1972 cités par Jarrige *et al.*, 1995). La rumination est caractérisée par une production de salive supérieure (250 à 300 ml / min) à celle produite au cours de l'ingestion (150 à 200 ml / min) ou du repos masticatoire (20 à 70 ml / min) chez les bovins (Bouisset, 1998). Généralement, la durée de rumination excède celle d'ingestion, mais sa durée totale ne semble pas pouvoir dépasser un plafond de 600 min / jour chez le mouton et 650 min / jour chez la vache laitière (Dulphy et Faverdin, 1987).

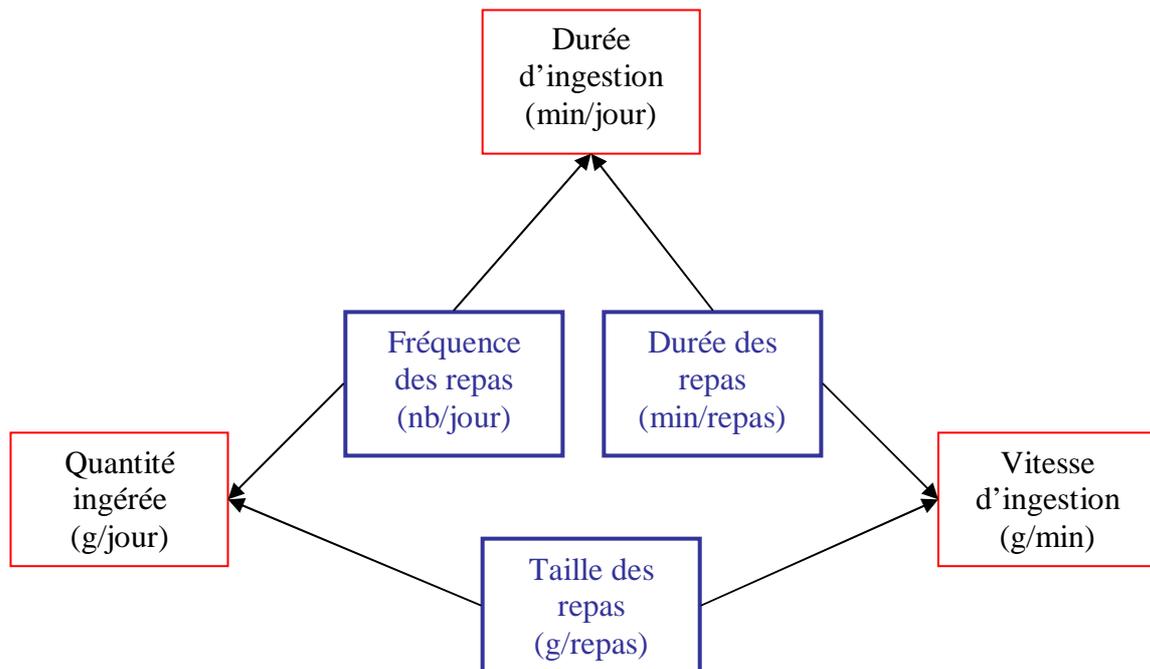


Figure 2. Relations entre les six paramètres définissant l'ingestion. Les paramètres en bleu concernent les repas, les paramètres en rouge concernent l'ingestion journalière (Nielsen, 1999).

La **mastication** se définit par l'ensemble des activités masticatoire, et correspond à la somme : ingestion + rumination. Les ruminants possèdent une capacité masticatoire maximale d'environ 1 000 min par jour, que ce soient des bovins, des ovins ou des caprins (Sauvant, 2000).

3.2. Rythme d'activité

Le **rythme** d'ingestion et de rumination de bovins nourris une ou deux fois par jour montre une périodicité dominante de vingt-quatre heures (Deswysen *et al.*, 1993 ; Fischer *et al.*, 2002). L'ingestion est généralement diurne : au pâturage, les petits ruminants réalisent naturellement deux repas principaux, l'un après l'aube et l'autre avant le coucher du soleil, séparés par des périodes d'ingestion intermédiaires (Dulphy et Faverdin, 1987 ; Dulphy *et al.*, 1988). Des ruminants alimentés à volonté en stabulation effectuent le plus grand nombre de repas en période diurne, avec deux pics, l'un en début et l'autre en fin de journée (Dulphy et Faverdin, 1987). Un ruminant alimenté à volonté avec des fourrages va consacrer entre 5 et 8 heures à leur ingestion, mais 60 à 80 % de la quantité ingérée journalière est concentrée au cours des repas principaux qui suivent chaque distribution (Baumont *et al.*, 1997). Dans le cadre d'une seule distribution par jour à des vaches laitières, Heinrichs et Conrad (1987) ont constaté une ingestion maximale au cours des trois heures suivant la distribution et un minimum atteint au bout de 14 h (ce qui correspond à la nuit pour une distribution matinale).

En stabulation, les repas principaux de chèvres représentent de 60 à 68 % de l'ingestion totale pour des régimes comprenant 45 à 70 % de concentré (Abijaoude *et al.*, 2000c). Cette proportion serait cependant supérieure pour des moutons nourris à base de foin (Abijaoude *et al.*, 2000c). Chez les chèvres, la quantité totale ingérée est plus fortement corrélée avec celle ingérée lors des repas secondaires, qu'avec celle ingérée lors des repas principaux (Abijaoude *et al.*, 2000a), mais très peu de données sont disponibles sur ces paramètres.

La rumination est dominée par l'ingestion, car une période de rumination ne vient jamais interrompre un repas, alors qu'elle peut être arrêtée par le déclenchement d'un repas (Jarrige *et al.*, 1995). Lorsque des petits ruminants reçoivent un régime riche en fourrages (80 %) distribué en un seul apport matinal, ils présentent deux périodes de rumination intense : de midi à 15 h et de 21 h au repas du matin (Focant, 1984). Pour des vaches ou des moutons nourris deux fois par jour, la rumination a principalement lieu la nuit, en tout début de

matinée, et en début d'après midi (Beauchemin *et al.*, 1990 ; Deswysen *et al.*, 1993 ; Fischer *et al.*, 2002). La phase de rumination nocturne est constante chez tous les ruminants domestiques, quelles que soient leurs conditions d'alimentation (Focant, 1984). Le rythme circadien de rumination semble être lié à l'éclairage et n'est pas modifié par l'horaire de distribution de la ration (Jarrige *et al.*, 1995). En revanche, dans le cas de deux distributions espacées de 12 heures et d'un éclairage continu, le rythme de 24 heures disparaît au profit d'un rythme de 2 fois 12 heures (Jarrige *et al.*, 1995). La rumination commence généralement entre 5 et 15 minutes après la fin d'un repas (Jarrige, 1988). Cependant, après les repas principaux, la période d'inactivité masticatoire précédant la rumination peut varier de 15 à 50 minutes (Dulphy et Faverdin, 1987). Cette latence est plus longue lorsque la quantité de fourrage offert est restreinte, ou quand on ajoute des aliments concentrés au fourrage (Jarrige *et al.*, 1995). Ce rythme n'est, en revanche, pas modifié par le stade de lactation, même si les quantités ingérées et les durées totales d'ingestion et de rumination le sont (Fischer *et al.*, 2002).

3.3. Particularités des chèvres ou des petits ruminants

Les caprins seraient plus aptes que les ovins à augmenter leur durée d'ingestion, de rumination et de mastication tout en diminuant leur vitesse d'ingestion lorsqu'ils reçoivent des aliments peu digestibles (Masson *et al.*, 1989). Les chèvres alimentées en libre choix consomment plus de fourrages grossiers que les brebis (Farid *et al.*, 1997), et semblent également boire moins que les ovins, lorsque la quantité d'eau bue est rapportée à celle de la matière sèche ingérée (Masson *et al.*, 1989). La durée d'ingestion (calculée par g de MSI par kg de poids métabolique) est également plus importante chez la chèvre que chez le mouton (Geoffroy, 1974). Tout ceci pourrait expliquer pourquoi les chèvres sont les ruminants les plus adaptés aux régions sèches n'offrant que des aliments très peu digestibles.

Geoffroy (1974) a montré, dans le cadre de deux distributions par jour, que la répartition des repas au cours du nyctémère présente une particularité chez la chèvre par rapport au mouton. Sur des régimes à base de foin ou d'ensilage, les chèvres présentent une reprise d'ingestion, parfois importante, entre les deux repas principaux au cours des 4^{èmes} à 7^{èmes} heures après le repas du matin (Geoffroy, 1974). Elle n'est cependant détectée qu'entre le repas du matin et celui du soir. Les chèvres, contrairement aux autres ruminants, sélectionnent fortement leurs aliments et ont tendance à laisser plus de refus (Morand-Fehr, 2003). Elles réalisent davantage de repas (Geoffroy, 1974), moins longs que ceux des ovins (Masson *et al.*,

1989) et ingèrent plus lentement que les ovins (Geoffroy, 1974 ; Focant, 1984 ; Dulphy *et al.*, 1990), même si Masson *et al.* (1989) ont observé des résultats opposés sur un régime à base de paille. Les chèvres trient leur ration, ce qui ralentit leur vitesse d'ingestion (Focant, 1984 ; Dulphy *et al.*, 1990). Enfin, en présence d'aliments connus, les chèvres modifient leurs préférences afin de diversifier au maximum leur régime, dans la mesure où ces aliments ne créent aucune perturbation digestive ou métabolique (Abijaoudé *et al.*, 2000b).

Des durées similaires de rumination ont été observées entre caprins et ovins (Focant, 1984), mais Geoffroy (1974) a observé une durée de rumination plus faible chez la chèvre tarie que chez le mouton. Les chèvres semblent réaliser moins d'épisodes de rumination (Focant, 1984) que les moutons, mais d'une durée supérieure. Geoffroy (1974) n'a cependant observé aucune influence de l'espèce sur le nombre de périodes de rumination. Les observations sont donc variables et à interpréter avec précaution. La durée de rumination durant la phase nocturne du nyctémère serait supérieure pour les chèvres comparée à celle des moutons (Geoffroy, 1974), mais le temps de latence entre la fin du repas principal et le début de la rumination serait plus important chez les chèvres que chez les ovins ou les bovins (Dulphy *et al.*, 1990).

Au cours de l'ingestion, la vitesse de mastication des aliments est presque deux fois plus élevée chez les petits ruminants (125 à 150 mouvements de mâchoire par minute chez le mouton) que chez les bovins (70 à 80). La vitesse de rumination est également beaucoup plus importante chez les ovins (80 à 100 mouvements par minute) que chez les bovins (40 à 60 mouvements par minute) (Jarrige, 1988). Le bol de rumination est constitué d'environ 50 à 80 g de matière brute chez le mouton, et de 600 à 1000 g chez les bovins (Jarrige, 1988). Des données équivalentes n'ont malheureusement pas été trouvées pour les caprins. Nous pouvons supposer que les valeurs pour les caprins sont relativement proches de celles des ovins.

3.4. Variabilité individuelle du comportement alimentaire

Les paramètres du comportement alimentaire des ruminants sont très variables entre les individus : Dulphy *et al.* (1990) ont observé plus de différences entre individus d'une même espèce, qu'entre espèces différentes. Cette variabilité individuelle semble d'ailleurs plus importante chez les petits ruminants que chez les vaches (Dulphy *et al.*, 1990). Le comportement alimentaire est influencé par des paramètres d'état de l'animal (poids vif, note d'état corporel, âge, stade physiologique...) et le niveau de production (Jarrige *et al.*, 1995),

mais une grande variabilité individuelle est également observée. Cette dernière semble être associée à des modifications ou à des adaptations digestives (Jarrige *et al.*, 1995). Par exemple, des vaches laitières de même poids vif et de même production ingérant en quantités identiques une ration très ingestible offerte à volonté peuvent présenter une dynamique de la prise alimentaire très différente (Jarrige *et al.*, 1995). Ainsi, trois vaches ingérant avec des vitesses moyennes très voisines peuvent présenter des vitesses d'ingestion instantanées qui varient du simple au double en début de repas (Jarrige *et al.*, 1995). Celle qui ingère le repas principal avec une vitesse extrêmement élevée présente des variations plus importantes des paramètres physico-chimiques du rumen, ce qui a pour conséquence de réduire l'activité microbienne (Jarrige *et al.*, 1995). Ce phénomène est cependant compensé par un accroissement du temps de séjour de la ration dans le rumen, du volume du rumen, et de la durée de rumination (Jarrige *et al.*, 1995). Il est néanmoins difficile de savoir si la digestion s'adapte au comportement alimentaire, ou si le comportement est modulé par les capacités digestives (Jarrige *et al.*, 1995). Deswysen *et al.* (1993) ont également observé une forte variabilité individuelle dans la répartition des activités d'ingestion et de rumination de génisses, et plus particulièrement dans la rythmicité de ces activités au sein d'une journée. Au vu de cette grande variabilité individuelle, les résultats présentés au paragraphe 3.2 sur les différences entre espèces sont à relativiser.

3.5. Mécanismes de régulation du comportement alimentaire

Les mécanismes de régulation agissent à plusieurs niveaux : le choix des aliments, les quantités ingérées et la répartition des périodes d'ingestion, de rumination et de repos masticatoire au cours du nyctémère. Ces trois niveaux sont principalement contrôlés par les sensations de faim et de satiété, eux-mêmes modulés par trois facteurs non indépendants : la palatabilité, les effets post-ingestifs et l'hédonisme.

3.5.1. Définitions

La **faim** est la perception de l'état de besoin organique lorsque le ruminant ne s'est pas alimenté depuis un certain temps (Gallouin et Focant, 1980). Elle correspond, sans doute, à un état de malaise et s'accompagne d'un désir vif et conscient de nourriture (Gallouin et Focant, 1980).

La **satiété** est, comme la faim, la perception d'un état interne. Gallouin et Focant (1980) la décrivent comme « un état euphorique apparaissant après une ingestion capable en général de satisfaire les besoins organiques ». Ce terme sous-entend un état de réplétion satisfaisant, mais correspond à un état d'anticipation, car lorsque l'animal s'arrête de manger, les besoins ne sont pas encore couverts, puisque la digestion est à peine commencée (Gallouin et Focant, 1980).

La **palatabilité** d'un aliment désigne les caractéristiques physiques (toucher, taille des particules, consistance, texture, odeur, facilité de préhension) et chimiques de l'aliment qui provoquent la réaction des sens et déterminent les préférences alimentaires de l'animal (Baumont, 1996). Elle est appréciée par la réponse ingestive de l'animal en fonction des qualités sensorielles de l'aliment (Gallouin et Le Magnen, 1987). Elle peut être évaluée par des mesures de libre choix (Jean-Blain, 2002) ou par la vitesse d'ingestion en début de repas lorsqu'un seul aliment est distribué (Baumont, 1996 ; Jean-Blain, 2002). Selon Gallouin et Le Magnen (1987) la palatabilité est « faim-dépendante », car son influence sur l'ingestion dépend de l'état de faim et de son degré. Elle est « faim-spécifique » car les stimuli sensoriels, issus d'un aliment palatable dans l'état de faim, ne le sont plus dans l'état de soif et réciproquement (Gallouin et Le Magnen, 1987). Enfin, la palatabilité est spécifique des caractéristiques sensorielles de chaque aliment (Gallouin et Le Magnen, 1987). La palatabilité va influencer l'initiation des repas, la vitesse d'ingestion et diriger le choix des animaux. Les caractéristiques physiques permettant une ingestion plus rapide augmentent la palatabilité, tandis que les caractéristiques chimiques vont plutôt agir par l'intermédiaire du goût, par exemple, les fourrages amers sont généralement évités (Chesworth, 1996). La palatabilité de l'aliment est le premier critère de choix pris en compte par les animaux. Ainsi Greenhalgh et Reid (1971) ont montré, avec de la paille et du foin, que changer la palatabilité d'un aliment sans en changer la digestibilité a un effet beaucoup plus important sur l'ingestion que d'en changer la digestibilité sans en changer la palatabilité. Cependant, le choix final de l'animal est indissociable des conséquences digestives induites par l'ingestion, et comme l'ont très justement fait remarquer Greenhalgh et Reid (1971), la définition du terme palatabilité reste très délicate, dans la mesure où il s'agit plutôt d'un concept que d'un terme scientifique exact. Ainsi, Provenza (1995) suggère que palatabilité et effets post-ingestifs sont très liés, et que des teneurs fortes en nutriments associées à une forte digestibilité sont souvent la cause d'une forte palatabilité et d'une préférence accrue pour cet aliment.

Les **effets post-ingestifs** correspondent à l'association d'un aliment à ses conséquences. Il semblerait que les animaux modifient d'autant plus leurs choix alimentaires que la modification physiologique entraînée est importante, plutôt que s'il s'agit d'une modification passagère même de forte amplitude (Keunen *et al.*, 2002). Une nette préférence est montrée pour les aliments qui apportent le plus d'énergie, mais les choix alimentaires visent à assurer un apport suffisant de fibres pour le bon fonctionnement ruminal, plutôt qu'à systématiquement maximiser l'apport énergétique de la ration (Baumont, 1996 ; Cooper *et al.*, 1996). Les ruminants peuvent se souvenir des effets positifs ou négatifs d'un aliment pendant un à trois ans sans y être à nouveau confrontés (Provenza, 1995). Le temps pendant lequel cet effet est mémorisé est cependant proportionnel à l'effet post-ingestif déclenché : les aliments très toxiques sont mémorisés à vie, tandis que les aliments provoquant de petits désagréments le sont durant moins longtemps (Forbes et Kyriazakis, 1995). La mémoire acquise est partiellement réversible, car lorsque ces aliments sont à nouveau présentés aux animaux, ces derniers vont en ingérer de petites quantités, et peuvent se mettre progressivement à en ingérer des quantités plus importantes si l'effet post-ingestif mémorisé s'avère modifié (Forbes et Kyriazakis, 1995).

L'**hédonisme** est lié aux sensations agréables ou désagréables que provoque l'aliment. L'ingestion n'est alors plus uniquement gouvernée par les sensations de faim et de satiété, car ce phénomène entre en compétition avec les facteurs physiologiques qui contrôlent l'ingestion (Baumont *et al.*, 2000). La distribution d'un aliment peut, par exemple, déclencher un nouveau repas, même si l'état de satiété est atteint, ceci dépendant, bien entendu, de la palatabilité de l'aliment (Baumont, 1996). L'hédonisme semble être la principale cause de la diversification des préférences à court terme lorsque les animaux reçoivent un régime couvrant tous leurs besoins (Morand-Fehr, 2003).

3.5.2. *Contrôle du comportement alimentaire*

Le contrôle des **quantités ingérées** intègre un contrôle à court terme du comportement alimentaire, visant à maintenir l'homéostasie de l'organisme, et un contrôle à long terme, qui dépend principalement des besoins nutritionnels et des réserves corporelles (Baumont *et al.*, 1997). Les moments de début et de fin de chaque repas sont contrôlés par les sensations de faim et de satiété (Chesworth, 1996 ; Jean-Blain, 2002). La sensation de faim serait, entre autres, déclenchée par une légère hypoglycémie, tandis que la sensation de satiété résulterait

d'une interaction entre différents signaux tels que la réplétion du tube digestif (et du rumen en particulier chez les ruminants) (Mbanya *et al.*, 1993), la quantité d'AGV (en particulier celle des acides acétique et propionique) (Montgomery *et al.*, 1963 ; Conrad, 1966 ; Mbanya *et al.*, 1993 ; Allen, 2000), la pression osmotique ruminale (Bergen, 1972 ; Allen, 2000) et la glycémie sanguine. Ces différentes informations sont intégrées au niveau de l'hypothalamus (Jean-Blain, 2002). Journet et Rémond (1976) ont, par exemple, observé que l'ingestion spontanée de vaches laitières après le vêlage augmente tant que la concentration plasmatique en AGV reste supérieure à 300 $\mu\text{Eq} / \text{l}$. De même, la concentration plasmatique en AGV diminue au cours d'un repas, et l'ingestion au cours du repas suivant est fortement corrélée à la concentration d'AGV atteinte lors de ce repas (Journet et Rémond, 1976). Ces paramètres sont cependant intimement liés, et c'est souvent l'addition de plusieurs de ces mécanismes qui conduit à une diminution de l'ingestion, alors que ces paramètres modifiés individuellement n'ont pas d'effet sur l'ingestion (Mbanya *et al.*, 1993). Tous ces paramètres contrôlent non seulement les quantités totales ingérées au cours de la journée, mais également les quantités ingérées au cours de chaque repas, ainsi que les intervalles entre les repas.

Le réflexe de rumination est stimulé par la présence de matériel fibreux dans le réticulo-rumen (Welch et Smith, 1971), mais l'obscurité pourrait être l'un des principaux stimulants de la rumination (Focant, 1984). En revanche, il existerait des facteurs inhibiteurs de la mastication, liés à l'intensité des fermentations ruminales, tels que la concentration en AGV, le pH ou la pression osmotique (Welch, 1982). Le besoin de rumination dépendrait également de la quantité ingérée pendant les 24 ou 48 h précédentes (Metz 1975 cité par Jarrige *et al.*, 1995). L'association de ces mécanismes de régulation de l'ingestion et de la rumination peut induire une modification de la répartition des activités au cours du nycthémère.

Le choix des aliments est tout d'abord guidé par les sens, en particulier l'odorat, le goût, le toucher, et la vue (Forbes, 1998). Ainsi, lorsqu'un animal n'a jamais été confronté à un aliment, la palatabilité va être le principal élément pris en compte dans le choix de l'animal. Ensuite, les mécano- et chémo-récepteurs du tube digestif transmettent les informations (effets post-ingestifs) provenant de la digestion au système nerveux central, ce qui peut en retour diminuer ou stopper l'ingestion (Forbes, 1992). Lors de confrontations répétées avec un aliment, le goût est progressivement associé aux conséquences post-ingestives que l'aliment induit. Ces deux paramètres seront alors pris en compte lors du choix final de l'animal (Forbes et Kyriazakis, 1995). Ainsi, la préférence relative d'agneaux pour des aliments riches

en énergie (orge par exemple) diminue après un repas composé de cet aliment, et peut devenir aversion après de nombreux petits repas ou une grosse consommation (Phy et Provenza, 1998).

Ces mécanismes de régulation permettent aux animaux de sélectionner un régime approprié à leurs besoins, dans la mesure où les aliments proposés sont clairement identifiables (goût, couleur..), et dans la mesure où l'animal a eu l'occasion d'apprendre les différences de valeur nutritive entre ces aliments (Forbes et Kyriazakis, 1995). Ainsi, lors d'expériences de libre choix, les ruminants consomment généralement environ 20 % de la quantité totale ingérée sous forme de fourrage non haché, même lorsqu'ils ont un accès continu à des aliments concentrés (Forbes et Kyriazakis, 1995). Par exemple, des chèvres ayant le choix entre différents types de concentrés, ont constitué, malgré des choix variés, des régimes aboutissant à une matière sèche ingérée totale identique, ainsi qu'à des teneurs en nutriments très similaires (Fedele *et al.*, 1997). Cooper et Kyriazakis (1993) ont également montré, chez des agneaux, qu'une augmentation de la proportion de protéines et d'énergie dans la ration entraîne un ajustement des quantités ingérées, et le maintien d'un apport constant de protéines, malgré une nette préférence pour les aliments riches en protéines et en énergie. Les ruminants semblent donc capables d'éviter la consommation excessive d'aliments très riches, ce qui pourrait leur permettre de limiter les désordres ruminiaux.

La régulation des quantités et de la proportion de nutriments ingérés n'est néanmoins pas réalisée à l'échelle d'un repas ou même d'une journée (Yeates *et al.*, 2002). Des chèvres choisissent généralement les rations ayant la plus forte proportion d'aliments concentrés lors de tests à très court terme (Abijaoudé *et al.*, 2000b), mais modifient leurs choix alimentaires à moyen terme (de l'ordre de la journée) après l'ingestion d'un aliment riche en énergie (James et Kyriazakis, 2002). Ces ajustements semblent mieux réalisés pour les protéines et les fibres (Fedele *et al.*, 1997) que pour l'énergie, et dans le cadre d'une alimentation à base de fourrages, car lorsque le pourcentage de concentré de la ration dépasse les 75 %, un excès d'énergie nette absorbée pouvant atteindre 20 à 50 % des besoins en énergie a pu être observé (Journet et Rémond, 1976).

En conclusion, de nombreux signaux biochimiques entrent en jeu dans la régulation de l'ingestion. Les préférences alimentaires dépendent des besoins (Provenza, 1995), mais résultent aussi de l'interaction entre la palatabilité et les effets post-ingestifs des aliments, tous deux déterminés par l'état physiologique de l'animal et les caractéristiques de l'aliment (Phy

et Provenza, 1998). Les choix réalisés par les animaux intègrent ces effets, ainsi que les valeurs nutritives et hédoniques des aliments, et permettent ainsi d'éviter tout excès ou carence nutritionnelle tout en atteignant rapidement un niveau de satiété satisfaisant (Baumont, 1996).

Le comportement alimentaire permet à l'animal de choisir les aliments à ingérer, les quantités à ingérer, et de répartir ses activités d'ingestion et de rumination au cours du temps. Ceci vise à minimiser au maximum l'inconfort dû, entre autres, à la faim, à une trop grande réplétion du rumen, ou à des fermentations ruminales trop intenses.

De très nombreux paramètres entrent en jeu dans les choix des animaux et dans la régulation des quantités ingérées. Cette régulation est variable selon les individus, selon les jours et est réajustée par un apprentissage continu, ce qui peut induire une certaine variabilité dans les quantités de chaque aliment ingérées quotidiennement. Ceci implique que si l'équilibre des fermentations ruminales n'est pas stable, l'animal peut très rapidement se retrouver, au moins ponctuellement, en état d'acidose sub-clinique.

4. FACTEURS INFLUENÇANT LA SUSCEPTIBILITE DES ANIMAUX A L'ACIDOSE

Comme cela a été défini au paragraphe 2, les principales causes de l'acidose semblent être une mauvaise adaptation du rumen au régime, et l'ingestion trop rapide, ou en trop grande quantité, de glucides rapidement fermentescibles. De nombreux paramètres, dont la composition du régime, le comportement individuel de l'animal, ou la conduite des troupeaux, pourraient donc influencer la susceptibilité des animaux à l'acidose.

4.1. Composition du régime

Les compositions chimique et physique de la ration jouent un rôle primordial dans les risques d'apparition de l'acidose, car celles-ci sont directement liées à la fermentation de la matière organique ingérée.

4.1.1. *Composition chimique*

La fermentation de la matière organique dans le rumen produit des gaz, des acides gras volatils, de l'ammoniac ainsi que des corps microbiens et de l'énergie (Sauvant *et al.*, 1999). Ce sont essentiellement les glucides, et surtout ceux issus des contenus cellulaires, qui sont impliqués dans le phénomène acidogène, l'implication des lipides et des protéines restant négligeable (Sauvant *et al.*, 1999). Malestein *et al.* (1984) ont ainsi évalué que le risque d'acidose lactique engendré par un concentré, mesuré par l'effet relatif du concentré sur l'accumulation d'acide lactique et la chute de pH par rapport au concentré le plus acidogène, était corrélé aux quantités de glucose, fructose et protéines solubles des aliments. Les glucides solubles et les pectines sont dégradés rapidement et ont donc un fort pouvoir acidogène (Sauvant *et al.*, 1999 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006). En revanche, l'amidon est dégradé moins rapidement et son pouvoir acidogène dépend de sa vitesse de dégradation (Sauvant *et al.*, 1999 ; Offner *et al.*, 2003 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006) qui est très variable selon les matières premières. On distingue ainsi les amidons « lents » (maïs, sorgho, millet...) comprenant moins de 20 % de fractions solubles, des amidons « rapides » (orge, avoine, blé) comprenant 60 à 90 % de fractions solubles (Offner *et al.*, 2003 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006 ; Sauvant *et al.*, 2006). Ces derniers ont un pouvoir acidogène plus important. Le pouvoir tampon intrinsèque des aliments et des rations est également très variable, ce qui peut influencer l'acidogénicité de la ration (Giger-Reverdin *et al.*, 2002 ; Rustomo *et al.*, 2006).

L'augmentation de la proportion de matières grasses peut accroître les risques d'acidose en diminuant le nombre de protozoaires ruminiaux dont le rôle est de stocker de l'amidon, de limiter la prolifération bactérienne et de stabiliser les fermentations (Nordlund, 2003). L'augmentation du BACA (bilan anions cations) de la ration a, en revanche, un effet positif sur l'ingestion et la production du lait lorsque les animaux reçoivent un régime acidogène (Peyraud et Apper-Bossard, 2006 ; Sauvant *et al.*, 2006), et permet de limiter les chutes postprandiales du pH ruminal (Krause et Oetzel, 2006). Ceci pourrait s'expliquer par le maintien de la concentration en bicarbonates sanguins nécessaires à stabilisation du pH, et donc à la régulation de l'acidose, mais ces résultats restent controversés (Peyraud et Apper-Bossard, 2006).

4.1.2. *Fibres et granulométrie*

La proportion de fibres dans la ration est généralement estimée par la méthode de Van Soest et Wine (1967). Cette méthode permet de déterminer trois fractions. Le NDF (Neutral Detergent Fibre) représente globalement l'ensemble "hémicellulose + cellulose + lignine", l'ADF (Acid Detergent Fibre), l'ensemble cellulose et lignine et l'ADL (Acid Detergent Lignin) correspond à la lignine. Le pourcentage de NDF représente les caractéristiques chimiques des fibres sans prendre en compte leurs caractéristiques physiques, telles que la taille des particules et leur densité (Mertens, 1996). Pourtant, ces dernières peuvent influencer les fermentations ruminales, le métabolisme et la production de matière grasse dans le lait, indépendamment de la quantité de NDF mesurée (Mertens, 1996). Ainsi, la diminution de la taille des particules du fourrage par broyage accroît la surface disponible pour la dégradation microbienne et libère une plus grande proportion de contenus cellulaires, ce qui accélère les processus fermentaires (Sauvant *et al.*, 1999). Dans le rumen, le pH et le rapport acétate sur propionate sont diminués d'environ 0,5 unités chacun (si le pH initial est inférieur à 6,2) lorsque le diamètre moyen des particules diminue de 1 mm en-dessous d'un seuil de 3 à 4 mm chez les bovins (Sauvant, 2000). La dégradabilité ruminale des fractions amylacées et protéiques est également influencée par le diamètre moyen des particules, à raison d'environ 12 points de dégradabilité par millimètre de diamètre moyen des particules (Sauvant, 2000). La diminution de la taille des particules diminue également les durées de rumination et donc, l'apport de tampons dans le rumen (Peyraud et Apper-Bossard, 2006). Mertens (1996) a proposé l'utilisation de deux nouvelles notions : le NDF efficace et le NDF physiquement efficace. Le NDF efficace représente toutes les propriétés de l'aliment capables de maintenir le taux butyreux du lait, en particulier sa capacité à simuler l'influence positive des fourrages sur le taux butyreux. Le NDF physiquement efficace représente les caractéristiques physiques des fibres, par exemple la taille des particules, qui influencent l'activité masticatoire (Mertens, 1996). Ainsi, un même fourrage haché de plus en plus finement présentera de moins en moins de NDF physiquement efficace. L'augmentation de ce dernier dans le régime augmente la durée de rumination, et, de ce fait, accroît la digestibilité des fibres (Yang et Beauchemin, 2006). Ceci pourrait donc limiter le risque d'acidose, même si Beauchemin et Yang (2005) n'ont pas observé, chez des vaches laitières, de diminution du pourcentage de temps passé sous des pH de 5,8 ou 5,5 lorsque le NDF physiquement efficace augmente.

4.2. Adaptation du comportement alimentaire à la composition du régime

4.2.1. Durée quotidienne de mastication

Les durées d'ingestion, de rumination et donc, de mastication, dépendent de la composition du régime. Le Tableau 1 donne, à titre d'exemple pour des caprins, les durées d'ingestion, de rumination et de mastication observés avec différents types de ration. La durée quotidienne de mastication des chèvres augmente lorsque la proportion de fourrage ou de NDF de la ration augmente. Dans toutes les expériences citées, cette augmentation de la durée totale de mastication résulte d'une augmentation simultanée des durées d'ingestion et de rumination (Focant, 1984 ; Dulphy et Carle, 1986 ; Kawas *et al.*, 1991 ; Carvalho *et al.*, 2006). La durée totale de rumination quotidienne est ainsi diminuée de plus de trois heures entre un régime à 80 % de foin et un régime à 80 % de concentré chez des petits ruminants (Focant, 1984). Pour les vaches laitières, une augmentation de la proportion d'ensilage dans la ration entraîne également une augmentation linéaire du temps de rumination, et donc de mastication, tandis que le temps de repos masticatoire diminue (Maekawa *et al.*, 2002a). En résumé, le temps total de mastication est donc plus faible pour des régimes plus concentrés (Abijaoudé *et al.*, 2000a) et moins riches en NDF (Kawas *et al.*, 1991 ; Carvalho *et al.*, 2006), car l'augmentation de la proportion de concentré se fait logiquement au détriment de celle des fibres.

Le temps total de mastication est également diminué pour les rations finement hachées (Grant *et al.*, 1990). Une réduction d'1 mm de diamètre moyen des particules en-dessous d'un seuil de 3 à 4 mm diminue la durée de mastication d'environ 100 min / j chez les bovins, et une réduction d'1 mm de diamètre moyen des particules sous un seuil de 1 mm diminue la durée de mastication d'environ 500 min / j chez les ovins (Sauvant, 2000). La granulométrie influence d'ailleurs plus la durée de rumination que celle de l'ingestion (Sauvant, 2000).

Le pouvoir acidogène des régimes riches en concentré, pauvres en fibres et hachés finement est donc associé à une durée de mastication inférieure, et par conséquent à une production de salive inférieure. Il a cependant été montré que l'intensité de la sécrétion salivaire varie avec le type d'aliment, sa structure et la vitesse d'ingestion (Dulphy et Faverdin, 1987). Elle est ainsi inférieure pour du foin long par rapport à du foin broyé, mais supérieure pour un aliment concentré, même si la sécrétion totale par gramme de matière sèche ingérée est inférieure par rapport à des repas de fourrages. Les régimes riches

Tableau 1. Matière sèche ingérée (MSI, g/kg PV), durées d'ingestion, de rumination et de mastication de chèvres selon le rapport fourrage/concentré (F/C) ou la proportion de NDF de la ration (min/jour).

Référence	n ^a	Stade ^b	Ration	MSI	Ingestion	Rumination	Mastication
Kawas <i>et al.</i> , 1991	9		F/C : 75/25	24,2	207	363	570
	9	lactation	F/C : 60/40	30,0	214	339	553
	9		F/C : 45/55	34,2	188	299	487
Dulphy et Carle, 1986	5	tarries	Foin	18,5	264	417	681
	3		Ensilage	21,9	277	395	672
Focant, 1984	3	tarries	80 % foin	18,3	-	474	-
	3		80 % orge	18,3	-	291	-
Carvalho <i>et al.</i> , 2006	10		NDF 30 %	48,6	236	311	547
	10		NDF 37 %	48,5	272	360	632
	10	lactation	NDF 43 %	45,7	294	393	687
	10		NDF 49 %	44,9	327	438	764
	10		NDF 56 %	42,0	349	470	819

^a nombre d'animaux utilisés

^b stade physiologique

en concentré entraînant des fermentations ruminales plus intenses et une chute de pH ruminale plus marquée que les régimes fibreux, c'est justement pour ces régimes riches en concentré qu'il faudrait des quantités importantes de tampons. Cette diminution de la quantité totale de salive produite pour les régimes riches en concentré peut donc accentuer la chute postprandiale du pH ruminal, limiter la remontée du pH pendant la rumination, et donc accentuer les risques d'acidose.

4.2.2. *Ingestion et repas*

Chez des chèvres nourries à base de fourrages, la durée des repas principaux varie entre cinquante minutes pour du foin et trente minutes pour de l'ensilage d'herbe jeune (Dulphy et Carle, 1986). La durée des repas principaux des chèvres diminue également lorsque la proportion de concentré augmente (Abijaoudé *et al.*, 2000a ; 2000c) ou lorsque le pourcentage de NDF de la ration diminue (Carvalho *et al.*, 2006). Carvalho *et al.* (2006) ont, cependant, également observé une diminution de la durée des repas secondaires lorsque le pourcentage de NDF diminue. Cette diminution de la durée des repas, avec des régimes riches en concentré, est certainement due à la satiété précoce induite par l'augmentation rapide de l'intensité des fermentations ruminales induisant une production d'AGV importante (Allen, 2000 ; Forbes, 2007). L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration entraîne aussi une augmentation de la vitesse d'ingestion pendant les repas principaux, mais une diminution de la vitesse d'ingestion pendant les repas secondaires (Abijaoudé *et al.*, 2000a). Ceci peut s'expliquer par une augmentation du tri, majoritairement réalisé durant les repas secondaires, et exacerbé avec un régime riche en concentré (Abijaoudé *et al.*, 2000a).

Chez des chèvres nourries à base de fourrages, le nombre de repas est doublé pour de l'ensilage par rapport à du foin (Dulphy et Carle, 1986). Une augmentation du nombre de repas a été observée lorsque le pourcentage de NDF de la ration augmente (Carvalho *et al.*, 2006), mais également lorsque le pourcentage de concentré augmente (Abijaoudé *et al.*, 2000a). L'augmentation du nombre de repas avec celle du pourcentage de NDF peut s'expliquer par une augmentation du temps total de mastication, et par un encombrement ruminal supérieur des régimes riches en fibres (Forbes, 2007). Par contre, dans le cas de régimes riches en concentré, l'augmentation du nombre de repas peut être interprétée comme une conséquence des fermentations ruminales plus importantes entraînant une satiété rapide (Forbes, 2007). Ceci entraîne une répartition plus importante de l'arrivée de glucides dans le rumen au cours de la journée, ce qui est confirmé par le fait que l'augmentation de la

proportion de concentré, dans le régime de chèvres, entraîne une diminution de la proportion d'aliments ingérés au cours des repas principaux, et donc, une augmentation de la proportion d'aliments ingérés au cours des repas secondaires (Abijaoudé *et al.*, 2000c). Ainsi, l'ingestion d'un aliment plus digestible semble être plus répartie au cours de la journée, entraînant une périodicité inférieure à vingt-quatre heures (Deswysen *et al.*, 1993).

Lorsque le pourcentage d'aliment concentré augmente, la régulation de l'ingestion semble donc avoir principalement lieu lors des repas secondaires, dont le nombre augmente, en particulier en soirée et pendant la nuit, afin de répartir au mieux les apports de matière organique fermentescible au cours de la journée (Abijaoudé *et al.*, 2000a).

4.2.3. *Rumination*

Des petits ruminants qui reçoivent un régime riche en fourrages (80 %) en une seule distribution matinale présentent deux périodes de rumination intense en début d'après midi et pendant la nuit (Focant, 1984). Selon Jarrige *et al.* (1995), les différences journalières des durées de rumination, entre différents types de fourrages et différents modes de conservation, seraient plus dues à la variation de la durée des périodes de rumination qu'à la variation de leur nombre. L'augmentation du pourcentage de concentré de 20 à 80 % entraîne une diminution presque totale de la rumination pendant la phase éclairée du nyctémère, mais peu de modifications pendant la phase nocturne (Focant, 1984). Ceci est dû à une diminution du nombre de périodes de rumination sans modification de la durée moyenne des périodes (Focant, 1984), ce qui est contraire aux résultats de Jarrige *et al.* (1995) sur les fourrages. En effet, pour cet auteur, la réduction de la rumination par manque de fibrosité porte sur le nombre des cycles par période de rumination, car leur durée est accrue d'environ 10 % lorsque du fourrage broyé est distribué à la place de fourrage entier (Jarrige *et al.*, 1995). Ceci est, en majeure partie, dû à l'allongement de l'intervalle entre les bols qui traduit une certaine difficulté de régurgitation (Jarrige *et al.*, 1995).

La distribution d'une proportion plus importante de céréales (80 % au lieu de 20 %) augmente de plus de deux heures le temps de latence entre la distribution des aliments et la première période de rumination (Focant, 1984), mais cette mesure ne prenait pas en compte la durée du repas principal. Lorsque cette dernière est prise en compte, le temps de latence entre la fin du repas principal et le début de la première période de rumination augmente avec les ensilages (maïs et herbe) par rapport à du foin, ou lorsque le pourcentage de concentré augmente (Dulphy *et al.*, 1990).

Les animaux recevant un régime riche en concentré, potentiellement source d'acidose sub-clinique, modifient donc leur comportement alimentaire et leur rythme quotidien d'activité. Ceci permet de limiter l'arrivée massive de glucides rapidement fermentescibles dans le rumen en multipliant les repas, et donc de limiter, au moins partiellement, les risques d'acidose.

4.3. Conduite d'élevage

Pour un même régime distribué, des différences de conduite de troupeau peuvent modifier le comportement alimentaire des animaux et donc, leur susceptibilité à l'acidose.

4.3.1. Conduite en lots

La conduite en lots augmente le niveau global d'ingestion et la fréquence des repas, mais diminue la durée d'ingestion, ce qui implique une augmentation de la vitesse d'ingestion (Ingrand, 2000). Chez des vaches laitières, l'augmentation du nombre d'animaux par lot entraîne une diminution de la proportion des vaches s'alimentant après la traite, ainsi qu'une augmentation du temps passé debout à attendre (pour aller à la traite, aller à l'auge...), et donc, une diminution du temps passé à ruminer (Grant et Albright, 2001). Ceci pourrait donc augmenter les risques d'acidose pour un même régime distribué.

La conduite en groupes entraîne également la mise en place d'une hiérarchie sociale, ce qui peut influencer le comportement alimentaire individuel. En effet, les vaches laitières dominantes passent plus de temps à ingérer, mais ceci n'est pas forcément corrélé à un niveau d'ingestion supérieur, ni à une production laitière plus élevée (Ingrand, 2000). Les dominées ont donc une vitesse d'ingestion supérieure pour compenser leur durée d'ingestion moins importante. Dans des groupes de bovins à l'engraissement, les dominants ingèrent également plus longtemps que les dominés, essentiellement au cours de repas moins nombreux, mais plus longs (Ingrand, 2000). Les animaux en groupes peuvent aussi ingérer des rations plus ou moins riches en concentré et en matière organique fermentescible par rapport à la ration distribuée, en particulier dans les groupes importants ayant un accès limité à l'auge. Les animaux dominants mangent en premier, et consomment donc en proportion plus d'aliments concentrés et moins de fibres que les animaux dominés (Kleen *et al.*, 2003). Les dominants semblent donc manger des rations plus concentrées avec une vitesse d'ingestion inférieure, et les dominés des rations plus fibreuses avec des vitesses d'ingestion supérieures. Tout ceci peut modifier notablement les fermentations ruminales, et les risques d'acidose.

4.3.2. Fréquence des distributions

L'augmentation du nombre de distributions de rations mixtes de deux à quatre, ou de concentré de une à deux, n'entraîne généralement pas de modification des quantités totales de matière sèche ingérée par des vaches laitières ou des moutons (Klusmeyer *et al.*, 1990 ; Castro *et al.*, 2002). Les durées journalières d'ingestion et de rumination de moutons ne sont pas non plus modifiées entre une et deux distributions journalières (Dulphy *et al.*, 1988). Par contre, une distribution unique le matin entraîne une quantité ingérée supérieure lors du repas principal, ainsi que la multiplication des petits repas, mais aucun autre grand repas (> 60 min) n'est identifié par la suite (Dulphy *et al.*, 1988). L'augmentation du nombre de distributions permettrait de limiter l'amplitude des variations postprandiales du pH chez les bovins (Soto-Navarro *et al.*, 2000 ; Schwartzkopf-Genswein *et al.*, 2003 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006), mais cet effet est limité lorsque les animaux ont un accès continu à l'auge, et qu'ils peuvent fractionner leurs repas. En outre, une fréquence de distribution trop importante ne réduit pas l'ampleur de la chute de pH postprandiale, mais peut entraîner la multiplication d'épisodes d'ingestion extrêmement rapides pouvant perturber le système digestif de bovins (Schwartzkopf-Genswein et Gibb, 2000 ; Krause et Oetzel, 2006 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006). Ceci peut alors induire un pH ruminal moyen inférieur à celui d'animaux recevant des apports moins fragmentés, car la valeur initiale du pH n'est pas atteinte entre deux distributions (Schwartzkopf-Genswein et Gibb, 2000 ; Oetzel, 2003b). Ainsi, chez des vaches laitières, l'augmentation du nombre de distributions de deux à quatre a eu tendance à diminuer le pH moyen ruminal et à augmenter la concentration moyenne en AGV (Klusmeyer *et al.*, 1990). Une augmentation du nombre de distributions de 2 à 14 a, par contre, permis d'obtenir un pH moyen supérieur, une diminution des variations journalières du pH, ainsi qu'un rapport acétate sur propionate supérieur chez des vaches laitières (Kaufmann, 1976). Ce résultat pourrait, cependant, en partie s'expliquer par le fait que, pour un même apport de concentré, le fractionnement des apports en 14 distributions a entraîné une consommation de foin supérieure dans cette expérience (Kaufmann, 1976), et il est donc difficile de dissocier les effets de la fragmentation des apports de ceux induits par la modification de la quantité de foin consommée. Dans le cas de transitions alimentaires vers des rations concentrées, Tremere *et al.* (1968) ont montré que la fragmentation des apports en 2 ou 3 distributions permet de diminuer le rapport fourrage sur concentré limite avant que les vaches laitières n'arrêtent d'ingérer. Cela semble donc permettre une adaptation plus rapide du rumen aux changements de régime.

Enfin, même si les animaux viennent toujours à l'auge lors des distributions de nourriture, Schwartzkopf-Genswein et Gibb (2000) ont observé, lorsque les distributions sont multipliées, que moins de 50 % des bovins présents à l'auge après la distribution étaient effectivement en train de manger. Une multiplication des distributions n'entraîne donc pas obligatoirement une augmentation des repas et de l'ingestion, et il semble difficile d'orienter « artificiellement » le comportement alimentaire des animaux.

4.3.3. *Ration complète vs aliments séparés*

La distribution d'une ration complète permet d'éviter les repas de céréales et pourrait donc limiter les risques d'acidose (Hernandez-Urdaneta *et al.*, 1976), minimiser le tri entre les différents aliments et permettre, à priori, une meilleure adéquation entre la ration calculée et la ration réellement ingérée (Maekawa *et al.*, 2002a). Maekawa *et al.* (2002a) ont ainsi montré que, lors d'une distribution séparée du fourrage et des concentrés en proportions égales, la ration effectivement consommée par des vaches laitières a été de 40 % de fourrage et 60 % de concentré.

Chez des vaches laitières, le temps d'ingestion d'une ration complète est plus important que celui nécessaire à l'ingestion d'aliments séparés, ce qui est dû, en particulier, à une vitesse d'ingestion supérieure (basée sur la matière sèche) des concentrés distribués à part (Maekawa *et al.*, 2002a). Les vitesses d'ingestion de l'ensilage et de la ration complète sont, par contre, identiques (Maekawa *et al.*, 2002a). Lorsque les aliments sont présentés séparément, la vitesse d'ingestion supérieure associée à une moindre mastication des concentrés pourrait avoir un effet négatif sur le pH par rapport à une ration complète. Cependant, si l'on raisonne sur les proportions de fourrage et de concentré effectivement consommées par les vaches, le pH ne varie pas entre aliments séparés et ration complète (Maekawa *et al.*, 2002a). Lorsque l'on raisonne, par contre, sur les proportions de fourrage et de concentré offertes, la distribution des aliments séparément entraîne bien un pH ruminal minimal inférieur et plus variable par rapport à la ration complète, car les vaches consomment une plus faible proportion de fourrage que celle offerte.

Le taux de salivation (ml / min) de vaches laitières au cours des repas a tendance à être supérieur pour les rations complètes par rapport aux aliments séparés, tandis que celui au cours de la rumination tend à être inférieur pour les rations complètes par rapport aux aliments séparés (Maekawa *et al.*, 2002a). Par contre, pour un temps total de rumination identique

entre les deux modes de rationnement, le temps passé à ruminer par kilogramme de NDF est inférieur dans le cas d'une ration complète, et est constitué de périodes plus courtes que pour des aliments séparés. La moindre salivation au cours du repas pour les aliments séparés est donc compensée par une salivation supérieure pendant une durée de rumination plus longue, et la production totale de salive est finalement identique (Maekawa *et al.*, 2002a).

4.3.4. *Alimentation ad libitum vs rationnée*

L'alimentation délivrée *ad libitum* à des bovins permet de maximiser les quantités journalières ingérées, mais ceci entraîne souvent une amplification des variations journalières des quantités ingérées, et des épisodes de surconsommation générateurs d'acidose (Schwartzkopf-Genswein et Gibb, 2000). A l'opposé, une alimentation restreinte permettrait de limiter les problèmes digestifs liés à une surconsommation d'aliment, et donc d'améliorer les performances en maximisant l'ingestion moyenne au cours des différents repas (Schwartzkopf-Genswein et Gibb, 2000 ; Schwartzkopf-Genswein *et al.*, 2003). En revanche, cela peut entraîner un épisode de surconsommation à la distribution suivante (Oetzel, 2003a). Une distribution *ad libitum* du foin dans une auge commune, et des concentrés en stalles individuelles, peut également induire une proportion supérieure de concentré ingérés pour les animaux dominés, ayant un accès restreint au foin, d'où des risques accrus d'acidose (Nordlund, 2003).

La restriction des apports entraîne une meilleure digestibilité des fibres lignocellulosiques (ADF) et un pH ruminal supérieur avant le repas, même si cela entraîne globalement peu de modifications des paramètres ruminiaux et n'empêche pas la chute de pH postprandiale chez des agneaux, (Hart et Glimp, 1991). En revanche, cela implique la réalisation de quelques repas importants par jour au moment des distributions, et une vitesse supérieure d'ingestion pour une durée inférieure (Schwartzkopf-Genswein *et al.*, 2003), surtout lorsque les animaux sont en groupe. Ceci peut induire un pH ruminal plus variable et plus bas que dans le cadre d'une alimentation *ad libitum* (Schwartzkopf-Genswein *et al.*, 2003). Les résultats sont cependant variables selon les expériences et les effets sur le pH ruminal semblent rester relativement faibles.

4.3.5. Régularité des quantités distribuées

Des variations journalières des quantités distribuées n'entraînent pas de variation du nombre de repas, ni de leur taille dans le cadre d'une alimentation *ad libitum* pour des bovins (Cooper *et al.*, 1999). Cependant, Schwartzkopf-Genswein *et al.* (2004) ont observé qu'une variation journalière de 10 % des quantités distribuées tendrait à diminuer le pH moyen ruminal et à augmenter le temps passé sous des pH de 5,8 ou 5,5 chez des bovins en croissance. Le temps passé sous un pH de 6,2 a également été plus important pour des bovins en croissance nourris une fois par jour avec des variations journalières des quantités distribuées, que pour ceux nourris une ou deux fois par jour avec des quantités constantes (Soto-Navarro *et al.*, 2000). Cette durée supérieure de pH bas est associée à une accumulation d'AGV supérieure pour les bovins en croissance nourris une seule fois avec variation des quantités distribuées (Soto-Navarro *et al.*, 2000).

Dans le cadre d'une alimentation rationnée, de faibles variations quotidiennes des quantités distribuées (0,7 kg / jour) n'entraînent pas de variation de la matière sèche ingérée ni du pH moyen du rumen chez des bovins en croissance (Cooper *et al.*, 1999). En revanche, des variations plus importantes (1,4 kg / jour) provoquent une augmentation de la durée de pH inférieur à 5,6, sans effet significatif sur l'ingestion ou le pH moyen (Cooper *et al.*, 1999). Il pourrait donc y avoir une relation linéaire entre l'amplitude des variations et celle de l'acidose (Cooper *et al.*, 1999). Dans le cadre d'une alimentation *ad libitum*, des variations des quantités distribuées ont provoqué une augmentation du pH moyen du rumen et une diminution de la durée de pH inférieur à 5,6, c'est-à-dire une diminution de l'acidose, ce qui est contraire aux observations précédentes. Les variations, dans cette expérience, ont cependant été réalisées de manière cyclique, et la baisse globale de l'acidose peut résulter du fait qu'un épisode de surconsommation est suivi d'un épisode de sous consommation, ce qui permet de rééquilibrer la flore et le pH ruminiaux (Cooper *et al.*, 1999).

Ceci montre que les variations accidentelles des quantités apportées pourraient avoir un impact plus important sur les risques d'acidose que le nombre de distributions quotidiennes.

De nombreux facteurs peuvent influencer la susceptibilité des animaux à l'acidose. Aux facteurs « contrôlables » par les éleveurs (régime, conduite d'élevage) s'ajoutent des facteurs individuels d'adaptation des animaux à ce qui leur est imposé par l'éleveur.

La composition du régime représente un des principaux facteurs responsables de l'acidose sub-clinique, car une augmentation du pourcentage de concentré influence simultanément les fermentations ruminales vers une production d'AGV, et le comportement alimentaire vers une diminution de la mastication et donc, de l'apport de tampons dans le rumen. Cependant, les animaux semblent capables de s'adapter aux régimes riches en concentré pour limiter l'acidose.

L'influence des facteurs environnementaux de gestion des troupeaux paraît peu importante dans le cadre de fermentations ruminales stables, mais peut être la cause du déclenchement d'un épisode d'acidose dans le cadre de fermentations ruminales instables.

5. CONSEQUENCES D'UNE ACIDOSE INDUITE SUR LE COMPORTEMENT ALIMENTAIRE

Seules les conséquences d'acidoses induites sur l'ingestion et les choix alimentaires sont présentés dans cette partie, car aucune expérience concernant les autres paramètres du comportement alimentaire (rumination et rythme d'activité) n'a été trouvée dans la littérature, dans le cas d'acidose induite.

5.1. Conséquences sur l'ingestion

Les conséquences de l'acidose ont souvent été étudiées suite à une diminution artificielle du pH ruminal par un apport intra-ruminal d'une quantité plus ou moins importante de concentré ou de glucides rapidement fermentescibles chez des bovins en croissance (Brown *et al.*, 2000), ou par le remplacement brutal d'une partie de la ration complète de vaches laitières par des concentrés (blé/orge) (Keunen *et al.*, 2002 ; Keunen *et al.*, 2003 ; Krause et Oetzel, 2005).

L'induction d'une acidose par l'apport intra-ruminal d'une quantité plus ou moins importante de concentré (1,5 à 3 % du poids vif) a des conséquences variables selon les individus. Certains développent une acidose aiguë, d'autres une acidose chronique, et d'autres ne semblent pas affectés (Brown *et al.*, 2000). Considérant le développement clinique réel d'une acidose aiguë ou subaiguë (mesuré ici par la valeur minimale de pH moyen journalier observé au cours de l'expérience), Brown et al (2000) constatent, pour l'acidose aiguë, une chute extrêmement rapide de la matière sèche ingérée qui atteint un minimum (environ 2,5 kg par jour au lieu de 8 à 10 avant induction) après trois jours et ne ré-augmente pas ensuite, tandis que le pH, après avoir atteint un minimum, ré-augmente également après trois jours. Les animaux développant une acidose sub-clinique ne montrent qu'une très faible diminution de la quantité de matière sèche ingérée, d'ailleurs passagère. Dans cette expérience, la variation du pH ruminal est très similaire à celle des quantités ingérées et ne montre qu'une très faible diminution passagère (Brown *et al.*, 2000).

En revanche, Keunen *et al.* (2002) et Krause et Oetzel (2005) n'observent pas, chez des vaches laitières, de diminution de la matière sèche ingérée, malgré une diminution du pH ruminal moyen, après induction d'une acidose subaiguë par remplacement de 25 % de la ration complète par des concentrés sans transition (Keunen *et al.*, 2002) ou par ajout de 3 à 5 kg de concentré à la quantité de ration complète ingérée dans le cadre d'une alimentation *ad libitum* (environ 20 kg) après une période de restriction (Krause et Oetzel, 2005). L'ampleur de l'acidose induite semblait donc inférieure à celle de l'expérience de Brown *et al.* (2000) et ceci confirme que l'induction d'une acidose sub-clinique n'entraîne pas forcément de chute d'ingestion marquée.

La réponse des animaux à des situations acidogéniques induites est donc variable, difficilement prévisible et les conséquences sur l'ingestion ne sont visibles que pour des chutes de pH très importantes.

Chez des taurillons recevant un régime à base de 90 % de concentré, l'injection intraruminale d'une solution équimolaire de NaOH et KOH, dans des proportions visant à maintenir le pH supérieur à 5,6, augmente le pH moyen d'environ 0,5 unités pH, mais également la quantité totale ingérée, et la durée des périodes d'ingestion par rapport aux animaux non supplémentés (Fulton *et al.*, 1979). D'après Tremere *et al.*, (1968), l'injection de substances tampons (bicarbonate de sodium) dans le rumen n'empêcherait pas la chute d'ingestion, mais la décalerait seulement de cinq jours.

5.2. Conséquences sur les choix alimentaires

Keunen *et al.* (2002) ont montré qu'en situation d'acidose sub-clinique induite (n'entraînant pas de variation d'ingestion), la préférence de vaches laitières pour du foin de luzerne, par rapport à des bouchons de luzerne, augmente dès le deuxième jour d'induction de l'acidose, et que cette variation est négativement corrélée avec la valeur moyenne du pH ruminal. En condition non pathologique, les vaches laitières préfèrent les bouchons de luzerne au foin (Klusmeyer *et al.*, 1990). Les animaux sélectionnent donc des aliments capables d'améliorer les fermentation ruminales en augmentant l'apport de substances tampon à la suite d'une mastication, et donc d'une salivation, supérieures (Keunen *et al.*, 2002). Dans cette expérience, le changement de préférence alimentaire apparaît sans chute d'ingestion et est sans doute basé sur le fait que ces animaux avaient déjà expérimenté de l'acidose et l'effet bénéfique du foin sur l'acidose (Keunen *et al.*, 2002).

Cependant, dans des conditions similaires d'acidose induite, la consommation de bicarbonate de sodium en poudre n'est pas augmentée, et reste beaucoup plus variable selon les vaches que selon les régimes (Keunen *et al.*, 2003). Ce résultat peut être expliqué par une consommation totale de bicarbonate restée insuffisante pour avoir un effet sensible sur le pH ruminal (Keunen *et al.*, 2003), ainsi que par une palatabilité très faible du bicarbonate de sodium, en particulier sous forme de poudre (Morand-Fehr, 2003). Par contre, l'incorporation du bicarbonate de sodium dans des aliments ou des concentrés entraîne généralement une préférence pour ces aliments, lorsque les animaux reçoivent un régime riche en concentré. Si l'on propose à des agneaux nourris d'orge aplatie des granulés enrichis, soit en bicarbonate de sodium, soit en chlorure de sodium, la consommation de granulés enrichis en bicarbonate de sodium augmente avec la proportion d'orge dans la ration, tandis que celle des granulés enrichis en chlorure de sodium diminue (Phy et Provenza, 1998). Des agneaux ayant le choix entre des aliments riches en énergie (à base d'orge) supplémentés ou non en bicarbonate préfèrent également l'aliment supplémenté (Cooper *et al.*, 1996). L'ajout de bicarbonate à des rations à base d'orge entraîne cependant une diminution de l'énergie métabolisable apportée par ces rations (Cooper *et al.*, 1996), ce qui indique que ces aliments ne seraient pas spontanément préférés, car les animaux choisissent généralement les aliments qui apportent le plus d'énergie. Des vaches laitières en situation d'acidose sub-clinique préfèrent également des granulés enrichis en bicarbonate de sodium (Cumby *et al.*, 2001). Dans ce cas, cette préférence n'est peut-être pas uniquement due à l'acidose et à l'effet positif du tampon, mais pourrait également être due à une aversion croissante pour les granulés témoins fortement

enrichis en chlorure de sodium, et dont la consommation tend à s'annuler en fin d'expérience (Cumby *et al.*, 2001). Lorsque le bicarbonate est présenté en solution aqueuse, une augmentation de la part de concentré dans la ration entraîne également une augmentation de la consommation de la solution, malgré l'augmentation de l'osmolarité ruminale occasionnée par le sodium (sans variation de la quantité d'eau consommée en plus) (Phy et Provenza, 1998). L'association du bicarbonate de sodium avec différents arômes n'entraîne pas non plus de modification de la préférence des agneaux pour le bicarbonate, ceci pouvant même aller jusqu'à inverser les préférences naturelles pour les arômes utilisés (Phy et Provenza, 1998).

Cette préférence marquée pour le bicarbonate en situation d'acidose n'est donc pas due à une appétence supérieure pour les aliments enrichis en bicarbonate, mais bien à un besoin des animaux de limiter la chute de pH ruminal. Une modification directe des paramètres ruminiaux entraîne donc un changement des choix alimentaires réalisé dans le sens d'un retour à l'équilibre du rumen (Cooper *et al.*, 1996), la consommation finale de ces aliments dépendant en particulier de leur pouvoir d'amélioration du pH ruminal.

La réponse des animaux à des expériences d'induction artificielle d'acidose est très variable et n'implique pas toujours une chute d'ingestion.

Par contre, l'induction d'une situation acidogène entraîne une modification des préférences des animaux vers des aliments susceptibles de limiter les effets de l'acidose, ce qui confirme que les animaux sont capables d'adapter leur comportement alimentaire afin de limiter les déviations fermentaires liées à l'acidose.

6. PREVENTION DE L'ACIDOSE

De très nombreux facteurs peuvent influencer la réponse physiologique et comportementale des animaux à des régimes riches en concentré, et donc, leur susceptibilité à l'acidose. De ce fait, il semble très difficile de pouvoir prévenir l'occurrence de l'acidose de manière fiable et durable dans un troupeau. Cependant, quelques pratiques de rationnement peuvent permettre de limiter au maximum ces risques.

6.1. Recommandations pour l'élaboration des rations

Tous les pourcentages de cette partie sont exprimés par rapport à la matière sèche.

Journet (1995) recommande, pour des vaches laitières, d'apporter entre 35 et 45 % de fourrage sous forme de foin ou d'ensilage d'herbe, ou environ 55 % sous forme d'ensilage de maïs. Le pourcentage de cellulose brute ne doit pas être inférieur à 17 %, celui de la lignocellulose à 21 %, et la durée de mastication (calculée en fonction des aliments et de leur finesse de broyage ou de hachage) ne devrait pas être inférieure à 30 min par kg de MSI (Journet, 1995). Il est également recommandé, pour maintenir un pH supérieur à 6,0 en fin de repas de (Journet, 1995) :

- mélanger les concentrés avec les fourrages
- fractionner la distribution des aliments concentrés
- diminuer la teneur de la ration en glucides facilement fermentescibles (mais aucune valeur seuil n'est précisée)
- ne pas détruire la structure fibreuse des fourrages et des enveloppes des céréales par hachage ou broyage.

Sauvant *et al.* (1999) ont déterminé des caractéristiques de la ration nécessaires pour maintenir un pH ruminal moyen supérieur à 6,25, et donc limiter l'acidose. Ils ont estimé qu'il fallait :

- au minimum 35 % de NDF,
- au minimum 25 % de NDF issu de fourrage,
- une taille moyenne des particules de la ration d'au minimum 2,5 mm ou 40 % de la matière sèche sous forme de particules de taille supérieure à 2 mm,
- une proportion d'aliments concentrés d'environ 45 % maximum,
- une proportion d'amidon de 25 % maximum,
- une proportion d'amidon dégradable dans le rumen inférieure à 20 %,
- un indice de mastication supérieur à 40 min / kg MSI.

Ils ont également montré que le pH moyen ruminal passe en-dessous du seuil de 6,25 lorsque la matière sèche ingérée excède environ 2,5 % du poids vif (Sauvant *et al.*, 1999). Enfin, les rations peu mastiquées sont ingérées rapidement et sont, de ce fait, acidogènes. On estime que, chez le bovin, la vitesse moyenne d'ingestion doit être inférieure à 50 g / min pour que les fermentations ruminales soient normales (Sauvant *et al.*, 1999).

Le National Research Council (NRC, 2001) recommande, pour limiter l'acidose, une proportion maximale de glucides fermentescibles d'environ 30 à 40 % de la MS. Pour un régime comprenant au moins 19 % de NDF issu de fourrage, le NRC (NRC, 2001) recommande une proportion maximale de glucides cellulaires de 44 %, et une proportion minimale de NDF du régime de 25 %. Lorsque le pourcentage de NDF issu de fourrage est de 15 %, la proportion maximale de glucides cellulaires doit être diminuée à 36 %, tandis que la proportion minimale de NDF du régime doit être augmentée à 33 %. La taille minimale des particules permettant de maintenir le pH ruminal, la durée de mastication et le taux butyreux serait de 3 mm (NRC, 2001).

Les recommandations sont donc relativement variées selon les auteurs et concernent de nombreux paramètres. S'il est relativement facile d'intégrer les valeurs seuils de pourcentage de NDF, de glucides fermentescibles ou de concentré dans la formulation des rations, il est relativement difficile de contrôler les durées de mastications, et encore plus difficile de contrôler la vitesse d'ingestion des aliments, même si ces dernières sont fortement influencées par les caractéristiques du régime. Ces recommandations, représentent des indications de « bonnes pratiques » ou seuils à ne pas dépasser afin de limiter l'acidose. En revanche, au vu des très nombreux paramètres extérieurs à la ration pouvant influencer les fermentations ruminales, le respect de ces recommandations ne permet malheureusement pas de garantir l'absence d'acidose sub-clinique.

6.2. Supplémentations

6.2.1. Différents types de supplémentations

L'injection intra ruminale d'enzymes fibrolytiques à des agneaux permet d'augmenter la digestibilité de la matière sèche et des parois cellulaires, ce qui permet une augmentation des nutriments disponibles pour l'organisme (Pinos-Rodriguez *et al.*, 2002). Elle augmente également les quantités de matières sèche et organique ingérées, et tend à augmenter la quantité de NDF ingérée, sans effet sur le pH ruminal dans le cas d'un régime à base de fourrages (Pinos-Rodriguez *et al.*, 2002). Les résultats sont cependant variables selon les expériences. Bowman *et al.* (2003) ont observé que l'ajout d'enzymes dans la ration de vaches laitières n'avait pas d'effet sur la matière sèche ingérée, le pH ruminal ou les durées d'ingestion ou de rumination, mais tendait à augmenter la salivation au cours de l'ingestion,

ainsi que la salivation totale quotidienne, ce qui est associé à une digestibilité de la matière organique supérieure. En revanche, Lewis *et al.* (1996) ont observé que l'ajout d'enzymes fibrolytiques dans la ration ou le rumen de taurillons pouvait diminuer le pH ruminal, mais aucun effet négatif des enzymes fibrolytiques sur le pH n'a été montré chez des vaches laitières. L'ajout d'enzymes fibrolytiques dans la ration permettrait donc d'augmenter les performances de l'animal par une plus grande quantité de nutriments disponibles, suite à une amélioration de la digestibilité de la matière sèche et de la matière organique, sans influencer le pH ruminal et donc sans créer de risques supérieurs d'acidose. Leur efficacité reste cependant discutée (Jouany, 2006).

L'apport de substances tampons dans la ration est connu pour limiter la chute de pH ruminal, augmenter l'ingestion totale, la production de lait et le taux butyreux du lait (Kleen *et al.*, 2003 ; Krause et Oetzel, 2006 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006 ; Sauvant *et al.*, 2006). Selon Ha *et al.* (1983), l'ajout de bicarbonate de sodium augmente l'ingestion d'aliments acidogènes, et permet de maintenir un pH ruminal supérieur à celui observé avec des rations non supplémentées. Cependant, cette supplémentation entraîne simultanément une augmentation de l'osmolarité du rumen tendant à diminuer l'ingestion (Hart et Polan, 1984), ainsi qu'une diminution du temps de séjour dans le rumen (Denholm et Ling, 1987 cités par Cooper *et al.*, 1996), tendant à augmenter l'ingestion. Cette interaction entre effets positifs et négatifs du bicarbonate peut d'ailleurs expliquer que l'ajout de bicarbonate à un aliment riche en énergie n'entraîne pas d'augmentation de la quantité totale ingérée, mais seulement une préférence pour cet aliment par rapport à son équivalent non supplémenté (Cooper *et al.*, 1996).

L'apport de micro-organismes tels que *Enterococcus faecium*, *Lactobacillus plantarum* et la levure *Saccharomyces cerevisiae* pourrait modifier les fermentations ruminales et diminuer les risques d'acidose (Kleen *et al.*, 2003 ; Jouany, 2006). Ces micro-organismes sont principalement connus pour stimuler les utilisateurs de lactate (Kleen *et al.*, 2003). L'apport de bactéries utilisatrices de lactate telles que *Selenomonas ruminantium* et *Megasphaera elsdenii* pourrait également limiter les risques d'acidose, mais les résultats sont plus discutables (Kleen *et al.*, 2003). Il a également été proposé de stimuler la flore utilisatrice de lactate avant des changements brutaux de régime par une supplémentation directe en lactate ou en aliments enrichis en lactate, mais les résultats sont controversés (Kleen *et al.*, 2003 ; Krause et Oetzel, 2006).

L'objet de notre étude étant l'influence de l'apport de levures (*Saccharomyces cerevisiae*), les effets et modes d'action des autres micro-organismes ne sont pas détaillés.

6.2.2. Supplémentation en levures vivantes

Les levures sont des champignons unicellulaires, eucaryotes d'une taille d'environ 5 x 10 µm (Auclair, 2001). Les levures sont aérobies et ne peuvent donc pas se multiplier dans le rumen (Jouany, 2001) ou le tractus digestif, mais une bonne partie des levures ingérées sont retrouvées vivantes dans les fèces de l'animal (Auclair, 2001).

Les levures peuvent influencer l'écosystème et les fermentations ruminales par différents moyens.

- L'apport de levures stabilise la population de bactéries cellulolytiques, stimule leur activité de dégradation des fibres, et augmente de manière générale la quantité totale de micro-organismes dans le rumen (Jouany, 2001). Ceci peut être dû au fait que les levures sont capables de libérer des protéines extracellulaires ou des enzymes libres dans le milieu. De plus, de grandes quantités d'acides aminés sont libérées dans le milieu lors de la lyse des cellules de levures, et sont alors disponibles pour les micro-organismes (Jouany, 2001)

- Le milieu ruminal n'est pas en anaérobiose stricte, car de l'oxygène pénètre régulièrement dans le rumen, en particulier avec les aliments ingérés. Cet oxygène est généralement fixé aux particules ingérées et inhibe l'adhésion des bactéries cellulolytiques sur les particules alimentaires (Jouany, 2001). La présence de levures permet d'éliminer rapidement cet oxygène, de diminuer le temps de latence avant le début de la cellulolyse (Jouany, 2001), et d'augmenter la croissance des bactéries anaérobies strictes (Auclair, 2001).

- Dans le rumen, les levures s'attachent aux particules et interagissent avec les autres micro-organismes pour former une structure (consortium microbien). Elles métabolisent le glucose et les oligosaccharides produits par les bactéries amylolytiques (Jouany, 2001). Cette concurrence pour l'utilisation des sucres du milieu diminue plus particulièrement la quantité de sucres disponibles pour *Streptococcus bovis*, principale bactérie productrice de lactate, et donc limite la quantité de lactate produite (Chaucheyras-Durand et Fonty, 2002).

- Les levures peuvent ensuite stimuler la croissance et le métabolisme des bactéries utilisatrices de lactate telles que *Megasphaera elsdenii* and *Selenomonas ruminantium* par la libération de facteurs de croissance (acides aminés, vitamines et acides organiques) (Auclair, 2001 ; Chaucheyras-Durand et Fonty, 2002). Plus particulièrement, les levures accumulent de

l'acide malique intracellulaire et le libèrent ensuite dans le milieu, où il stimule notamment la croissance de *Selenomonas ruminantium* en présence d'acide lactique (Jouany, 2001)

Les deux phénomènes précédents induisent simultanément une diminution de la production de lactate et une augmentation de son utilisation, donc une diminution du lactate ruminal et une stabilisation du pH pour des régimes riches en concentré (Jouany, 2001).

Une analyse quantitative de l'influence de la supplémentation en levures vivantes sur la production et les fermentations ruminales est présentée en paragraphe 7.

Les particularités de chaque matière première du régime, ainsi que les interactions digestives entre les différents aliments, et l'adaptation individuelle des animaux font que les seuils proposés pour le calcul des rations ne sont qu'indicatifs. Ils ne garantissent pas l'absence d'acidose sub-clinique, mais permettent de limiter les risques d'acidose.

De nombreuses substances ont été proposées pour diminuer les risques d'acidose ruminale dans les élevages intensifs de ruminants. Cependant, la très grande variabilité de réponse des animaux à des régimes acidogènes entraîne une très grande variabilité de la réponse des animaux à ces suppléments alimentaires, et donc une efficacité discutée.

L'apport de levures semble être un bon moyen de stabiliser les fermentations ruminales et pourrait limiter les risques d'acidose sub-clinique, car la principale caractéristique des régimes acidogène, entraînant des risques d'acidose sub-clinique, est une instabilité des fermentations ruminales.

7. META-ANALYSE : INFLUENCE DE L'APPORT DE *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* SUR LES PARAMETRES RUMINAUX, L'INGESTION ET LA PRODUCTION LAITIERE CHEZ LES RUMINANTS

De nombreuses expériences étudiant l'influence de la levure *Saccharomyces cerevisiae* sur les fermentations ruminales, l'ingestion ou la production des animaux ont été publiées. L'apport de levures pourrait permettre de stabiliser les fermentations ruminales et d'augmenter la production des animaux recevant des régimes riches en concentré, mais les résultats sont extrêmement variables et il est donc difficile d'en tirer des conclusions fiables.

Objectifs

- Analyser quantitativement l'effet de la supplémentation en levures sur :
 - l'ingestion, la digestibilité de la matière organique et des paramètres ruminaux (pH, AGV, acide lactique et C2/C3), chez les ruminants
 - la production des ruminants laitiers
- Analyser l'influence de facteurs interférents (niveau d'ingestion, pourcentage de concentré, de NDF et de protéines dans la ration) pouvant modifier l'effet des levures sur ces paramètres.

Matériels et méthodes

Une méta-analyse a été réalisée sur 110 publications, représentant 157 expériences et 376 traitements. L'influence des levures a été analysée de manière qualitative (animaux recevant des levures vs. témoins) et quantitative en utilisant la quantité de levure distribuée (CFU) par kg de poids vif exprimée de la façon suivante : $\log_{10} (1 + (\text{CFU}/100 \text{ kg of PV}))$.

Les facteurs interférents ont été étudiés uniquement pour les paramètres influencés par la supplémentation en levures, en utilisant les expériences dans lesquelles le facteur considéré présentait plusieurs niveaux.

Résultats

Les analyses qualitatives et quantitatives ont globalement donné des résultats similaires.

L'apport de levures a augmenté le pH ruminal, mais aussi la concentration totale en AGV. Il a eu tendance à diminuer la concentration ruminale en acide lactique, mais n'a pas eu d'influence sur le rapport acétate sur propionate. L'apport de levures a également augmenté la digestibilité de la matière organique, la quantité de matière sèche ingérée, la production laitière, et a eu tendance à augmenter le taux butyreux du lait sans influencer le taux protéique.

L'effet positif des levures sur le pH ruminal a été plus important pour les régimes riches en concentré et chez les animaux à fort niveau d'ingestion. Il a été en revanche moins important pour les régimes riches en NDF.

L'influence positive des levures sur la concentration totale en AGV a été plus importante pour des niveaux d'ingestion élevés et des teneurs en protéines importantes dans la ration.

L'influence positive des levures sur la digestibilité de la matière organique a été plus importante pour les régimes riches en concentré ou riches en NDF.

La baisse de concentration en acide lactique suite à la supplémentation en levures a eu tendance à être moins importante pour les ruminants à hauts niveaux de production et avec les régimes riches en concentré.

Discussion et conclusion

- L'apport de levures semble pouvoir modifier les paramètres physico-chimiques du rumen de manière bénéfique pour l'animal en permettant une synthèse d'AGV plus importante, tout en conservant un pH relativement élevé, en diminuant la concentration en acide lactique, et en améliorant la digestibilité de la matière organique.

- D'une manière générale, l'influence des levures est plus importante pour des régimes riches en concentré et pour des animaux à fort niveau d'ingestion, c'est-à-dire dans le cas de régimes acidogènes distribués dans des élevages conduits de manière intensive.

- La plupart des facteurs interférents testés a modifié l'influence des levures sur les paramètres analysés, ce qui montre que de nombreux facteurs peuvent moduler l'influence des levures sur les paramètres ruminiaux, la digestibilité, ou les paramètres zootechniques. Ceci pourrait expliquer la très grande variabilité des résultats de la littérature.

Meta-analysis of the influence of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on ruminal parameters and milk production of ruminants

M. Desnoyers*^{†1}, S. Giger-Reverdin*, G. Bertin[†], C. Duvaux-Ponter* and D. Sauvant*.

*UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

[†]Alltech France, 14 place Marie-Jeanne Bassot 92593 Levallois-Perret cedex, France

¹ Corresponding author: Marion Desnoyers, UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation, centre de Grignon 78850 Thiverval-Grignon. Tel +33 (0)1 30 81 52 12, fax +33 (0)1 30 81 52 17, email: marion.desnoyers@agroparistech.fr

Interpretive Summary

Influence of yeast supplementation in ruminants. Desnoyers. A meta-analysis was performed on 110 papers and 157 experiments. Yeast supplementation increased feed intake, milk production, and also rumen pH, rumen volatile fatty acid concentration and organic matter digestibility. Yeast influence was greater on these parameters in animals offered high concentrate diets with a high level of intake than in those fed low concentrate diets with a low level of intake. This indicates that yeast may limit the negative effects of high concentrate diets within the rumen of high production ruminants thus maintaining levels of production.

Soumis au Journal of Dairy Science

ABSTRACT

The effects of yeast supplementation on intake, production and rumen fermentation characteristics have been largely studied, but results are inconsistent between different studies. A quantitative meta-analysis was applied to 110 papers, 157 experiments and 376 treatments dealing with yeast supplementation in ruminants. The objective was to highlight the major quantitative effects of yeast supplementation on intake, rumen fermentation and milk production and to identify major interfering factors. Yeast supplementation increased rumen pH (+ 0.03 on average) and rumen volatile fatty acid concentration (+ 2.17 mM on average), tended to decrease lactic acid concentration (- 7.8 mg/L on average) and had no influence on acetate to propionate ratio. Organic matter digestibility was also increased by yeast supplementation (+ 0.8 % on average). Yeast supplementation increased dry matter intake (DMI) (+ 0.44 g/kg Body weight (BW)), raw milk yield (+ 1.2 g/kg BW), tended to increase milk fat content (+ 0.05 %) but had no influence on milk protein content. Dose effects of yeast supplementation, expressed as $\log_{10}(1+(\text{CFU}/100 \text{ kg of BW}))$, globally confirmed the qualitative effects observed with the first analysis. The positive effect of yeast supplementation on rumen pH was more pronounced with high concentrate diets and with high DMI levels than with low ones. It was less pronounced with diets containing high neutral detergent fiber (NDF) levels. The positive effect of yeast supplementation on rumen volatile fatty acid concentration was more pronounced with high DMI levels and crude protein. The positive effect of yeast supplementation on organic matter digestibility was more pronounced in high concentrate diets and diets with high levels of NDF. The negative effect of yeast supplementation on lactic acid concentration tended to be less pronounced with high DMI levels and with predominantly concentrate based diets. The effects of interfering factors were globally similar when either dose effect or qualitative effect of yeast was taken into account. These results suggest improved rumen fermentation efficiency in supplemented animals when compared to non supplemented ones, even though a number of different factors can influence this effect.

Key words: meta-analysis, yeast, *Saccharomyces cerevisiae*, ruminant

INTRODUCTION

Most dietary compounds entering the rumen are degraded by numerous anaerobic micro-organisms (mainly bacteria and protozoa) present in the rumen fluid. Thus, rumen metabolism plays a key role in ruminant responses to their diet and adding yeast to the rumen ecosystem might influence fermentation and help the ecosystem to deal with high concentrate diets. One of the consequences of feeding high concentrate diets is the occurrence of sub-clinical ruminal acidosis (rumen pH below 6.25 (Sauvant et al., 1999)). Low pH in the rumen over long periods of time inhibits intake (Fulton et al., 1979, Owens et al., 1998) and cell wall digestion. This last aspect alters the energy value of the diet, particularly of its forage component. Moreover, the VFA profile in rumen fluid is altered with low acetate to propionate ratios (see reviews by Owens et al., 1998, Kleen et al., 2003, Sauvant et al., 2006) and sometimes a significant accumulation of lactic acid is observed (see review by Martin et al., 2006). Several authors have reviewed the influence of yeast supplementation on rumen digestion and ruminant performance. A number of these reviews mainly describe available papers on the whole yeast subject area but do not quantitatively analyze data available in these papers (Dawson, 2000, Jouany, 2001). Others present some quantitative analysis of yeast effects on milk production (Ali-Haimoud-Lekhal et al., 1999), rumen fermentation characteristics (Lescoat et al., 2000) or both (Robinson, 2002, Sauvant et al., 2004). Yeast seems to increase milk production (see review by Robinson, 2002, Abd El-Ghani, 2004, Stella et al., 2007) and to influence a number of rumen parameters such as pH, VFA concentration and total tract nutrient digestion (Erasmus et al., 1992, Robinson, 2002). Results are however very inconsistent across experiments, and some quantitative reviews did not observe any significant influence of yeast supplementation on milk production in late lactation dairy cows (Ali-Haimoud-Lekhal et al., 1999), or on rumen fermentation characteristics in cattle (Lescoat et al., 2000, Sauvant et al., 2004). The first objective of this paper was to overview the quantitative effects of yeast supplementation on dry matter intake, major rumen parameters (rumen pH, VFA concentration, lactic acid concentration and acetate to propionate ratio) and OM digestibility in both beef and dairy ruminants and on production performance of lactating animals. The second objective of this paper was to determine if some interfering or confounding factors such as DMI or diet composition could influence yeast effect and thus determine in which situations yeasts are the most efficient.

METHOD

A database was constructed from experiments involving dietary yeast supplements. Only in vivo experiments using at least one strain of *Saccharomyces cerevisiae* were used to build the database. All ruminants species used for meat or milk production were included in the database (cattle, goats, sheep and buffaloes). Selected papers contained at least data on rumen fermentation or digestibility measured in vivo, or milk production parameters for experiments involving dairy animals. Papers presenting more than one experiment, or various dietary compositions, were separated into experiments that were individually encoded. Each experiment contained two or more treatments (control vs. yeast), which were also individually encoded. A total of 110 papers divided in 157 experiments (**nexp**) and 376 treatments (**nt**) were pooled in the database. The list of papers used is available after the reference list. Yeast cultures were from at least 11 different commercial preparations. More than half of the experiments (91 out of 157) used Yea-Sacc¹⁰²⁶ (Alltech, Lexington, KY, USA). For some of the studies, there was a lack of basic information on either yeast concentration (73 exp), body weight of the animals (49 exp), dry matter intake (12 exp) or chemical analysis of the diet (28 exp). For these papers, body weight was estimated according to the animal species, age and sex, and yeast concentration according to the commercial product used if data was available in another paper using the same product. Dry matter intake and raw milk yield (**RMY**) were calculated per kilogram of body weight to allow comparison between cattle and small ruminants. When rumen parameters were analyzed at several sampling times, the mean value was entered in the dataset. No other pre-calculations were performed.

This whole dataset was divided into a “rumen dataset” (81 papers, nexp = 116, nt = 277) and a “production dataset” (50 papers, nexp = 61, nt = 141)

Interpretation of this database was based on a statistical meta-analysis (St-Pierre, 2001, Sauvant et al., 2008).

The basic statistical model applied to the data was:

$$Y_{ijk} = \mu + \text{YEAST}_i + \text{EXP}_j + E_{ijk}$$

Where:

Y_{ijk} : observations

μ : overall mean

YEAST_i : fixed effect of yeast

EXP_j : fixed effect of experiment j

E_{ijk} : random residual error

All the models were used without weighting the observations.

Yeast effect was first tested qualitatively (control vs. yeast) and then as a covariable according to level of yeast supplementation expressed as $\log_{10}(1+(\text{CFU}/100 \text{ kg of BW}))$ because the database contained both large and small ruminants. For each dependant variable experiments presenting normalized residues greater than 3.0 were discarded from the analyses but not from the analysis of other variables. For each statistical test the considered parameters are least square means (yeast vs. control) or the adjusted equation ($\log_{10}(\text{yeast concentration})$), n_{exp} , n_{t} , the value of the root mean square error (rmse), the probability of the test (P) for yeast effect and the percentage of “outlier treatments” (a) which presented normalized residues larger than 2.0. The fixed effect of experiment was always highly significant ($P < 0.001$) and is thus never provided. An effect was considered as significant at $P < 0.05$, considered as a tendency toward significance at $P < 0.1$, and P values between 0.1 and 0.2 are discussed.

Differences in experimental conditions between studies can affect the response to treatment. Some of these experimental conditions can be represented by quantitative or qualitative interfering or confounding factors. These factors will be referred to as interfering factors throughout the manuscript. Analysis of the influence of some interfering factors was performed using datasets extracted from the main ones, each dataset containing only the experiments with available data on the interfering factor tested. For a given parameter influence of interfering factors was assessed using, for each experiment, the slope of the response of the tested parameter as a function of yeast effect (yeast vs. control or $\log_{10}(\text{yeast concentration})$). Effect of each potential interfering factor was tested on this slope by linear regression for quantitative parameters or by one factor ANOVA for qualitative ones. The intercept of the regression was fixed at zero if it was not significantly different from zero on the first analysis. For this statistical test, provided information includes the mean, standard error, minimum and maximum values of the factors in the corresponding dataset (because the influence of the factor could be dependant on the range used for analysis), the regression equation, n_{exp} , the rmse value of the regression, the probability of the test (P) for the regression slope and the percentage of “outliers treatments” (a) which presented normalized residues larger than 2.0. All statistical analyses were performed with Minitab (version 1.2, 1998, Minitab Inc.).

Table 1. Meta-analysis of the effect of yeast supplementation on rumen parameters and organic matter digestibility

	nexp ¹	nt ²	Treatment ³		<i>P</i>	rmse	a ⁴
			Control	Yeast			
Rumen pH	97	231	6.31	6.34	*	0.11	17.5
VFA (mM)	77	177	95.2	97.3	**	4.84	11.7
Lactic acid (mg/L)	16	38	109.1	101.3	†	13.53	12.5
OM digestibility (%)	45	103	70.2	71.0	**	1.4	8.9

¹ number of experiments

² number of treatments

³ lsmeans

⁴ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0

†*P* < 0.10; **P* < 0.05; ***P* < 0.01; ****P* < 0.001

RESULTS

Rumen Fermentation and Digestibility

Qualitative Analysis: Yeast vs. Control Yeast supplementation increased rumen pH ($P = 0.023$), rumen VFA concentration ($P = 0.005$), and tended to decrease rumen lactic acid concentration ($P = 0.099$) (Table 1). Yeast supplementation had no influence on acetate to propionate ratio ($P = 0.9$).

Table 2 presents the effects of interfering factors significantly influencing yeast effect. The positive effects of yeast supplementation on rumen pH tended to be increased by DMI ($P = 0.07$), was increased by the proportion of concentrate in the diet ($P = 0.025$), and was logically decreased by the proportion of NDF in the diet ($P = 0.047$). No influence of diet CP ($P = 0.5$) was detected. The positive effects of yeast supplementation on rumen VFA concentration was increased by DMI ($P = 0.007$), by the proportion of concentrate ($P < 0.001$), NDF ($P = 0.041$) and CP ($P = 0.031$) in the diet. The negative effects of yeast supplementation on rumen lactic acid concentration tended to be attenuated by the proportion of concentrate in the diet ($P = 0.084$) and DMI ($P = 0.07$). There was no influence of dietary NDF ($P = 0.4$) or CP ($P = 0.5$) on the negative effects of yeast supplementation on rumen lactic acid concentration.

Organic matter digestibility was also increased by yeast supplementation (Table 1, $P = 0.007$) and the positive effect of yeast supplementation on OM digestibility was decreased by the proportion of concentrate in the diet ($P = 0.019$) and increased by proportion of dietary NDF ($P = 0.004$) (Table 2) No influence of dietary CP percentage ($P = 0.21$) and DMI ($P = 0.14$) was detected. There was no effect of species (cattle, sheep or goat, $P > 0.10$) on any of the measured parameters.

Eight papers tested simultaneously the effects of proportion of concentrate in the diet and yeast supplementation, and 11 tested simultaneously the effects of NDF content of the diet and yeast supplementation. However, the meta-analysis performed using only these papers did not confirm the results of the analysis on the whole dataset except for the effects of yeast supplementation on OM digestibility, which was increased by the proportion of NDF in the diet (regression slope = 0.039, $P = 0.007$, rmse = 2.15, $n_{exp} = 11$). There was no significant influence of dietary concentrate proportion or NDF content on the effect of yeast supplementation on rumen pH ($n_{exp} = 17$ and 25 for concentrate and NDF, respectively), VFA concentration ($n_{exp} = 15$ and 23 for concentrate and NDF, respectively) or OM digestibility ($n_{exp} = 10$ for proportion of concentrate in the diet) on these specific papers.

Table 2. Effects of interfering factors on the qualitative effect of yeast supplementation on rumen parameters and organic matter digestibility

	nexp ²	Interfering factor ¹				Regression ³	rmse	P	a ⁴
		Mean	SD	Min	Max				
Rumen pH									
DMI	66	26.3	8.58	10.4	46.3	+ 0.001	0.16	†	9.1
% Concentrate	77	50.5	26.08	0	100	+ 0.001	0.15	*	6.5
NDF (% DM)	48	40.9	15.31	21.5	80.1	0.16 - 0.004	0.16	*	8.3
VFA (mM)									
DMI	60	24.9	7.85	10.4	44.8	+ 0.099	7.14	**	6.9
% Concentrate	72	47.4	26.45	0	100	+ 0.054	6.80	***	4.2
NDF (% DM)	48	41.5	15.70	22.0	80.1	+ 0.050	7.34	*	6.3
CP (% DM)	58	14.0	3.37	6.2	21.5	+ 0.145	7.16	*	6.9
Lactic acid (mg/L)									
DMI	15	26.3	7.85	14.4	44.3	-0.382	20.68	†	6.7
% Concentrate	16	53.5	29.72	0	100	- 0.157	20.57	†	12.5
OM digestibility (%)									
DMI	39	28.1	9.56	10.8	46.3	2.20 - 0.052	2.02	0.1	5.1
% Concentrate	39	45.5	23.28	0	100	2.08 - 0.031	1.81	*	5.1
NDF (% DM)	26	47.8	17.94	21.5	80.1	+ 0.027	2.24	**	7.7

¹ characteristics of the range available for the considered interfering factor: mean, standard deviation, minimum (Min) and maximum (Max)

² number of experiments

³ regression equation (intercept is only presented when ≠0.00)

⁴ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0

†P < 0.10; *P < 0.05; **P < 0.01; ***P < 0.001

Quantitative Analysis: Effect of Yeast Dose. Consistent effects to those obtained with the qualitative analysis were obtained with this second approach (Table 3). Rumen pH ($P = 0.005$) and VFA concentration ($P = 0.022$) increased linearly with yeast dose. Rumen lactic acid concentration was not influenced by yeast supplementation but it should be noted that it approaches a level of significance ($P = 0.101$) and only 15 of the 81 experiments presented this data. Acetate to propionate ratio was again not influenced by yeast supplementation ($P = 0.8$).

The effects of interfering factors on the quantitative effect of yeast supplementation on rumen fermentation characteristics are presented in Table 4. The positive effect of yeast supplementation on rumen pH was again increased by the proportion of concentrate ($P = 0.009$), and decreased by the proportion of NDF ($P = 0.008$) in the diet but there was no effect of dietary CP ($P = 0.3$) or DMI ($P = 0.3$). The positive effects of yeast supplementation on rumen VFA concentration tended to be increased by the proportion of concentrate in the diet ($P = 0.084$), but no influence of the proportion of dietary NDF ($P = 0.6$) or CP ($P = 0.3$) in the diet or DMI ($P = 0.19$) was detected.

Organic matter digestibility also increased linearly with yeast dose (Table 3, $P = 0.004$). The effect of yeast supplementation on organic matter digestibility was decreased by the proportion of concentrate in the diet ($P = 0.020$) and increased by dietary NDF content ($P < 0.001$), CP content ($P = 0.013$) and DMI ($P = 0.002$) (Table 4).

There was no effect of species (cattle, sheep or goat, $P > 0.10$) in any of these parameters.

Intake and Production Parameters

Qualitative analysis: Yeast vs. Control. Yeast supplementation increased DMI ($P = 0.044$), raw milk yield ($P < 0.001$) and tended to increase milk fat content ($P = 0.07$) although it had no influence on milk protein content ($P = 0.7$) (Table 5).

Table 6 presents the influence of the interfering factors, except species, on these effects. The positive effects of yeast supplementation on DMI was increased by the proportion of concentrate in the diet ($P = 0.043$) but was not influenced by the proportion of NDF ($P = 0.47$) or CP ($P = 0.53$) in the diet, or ruminant species ($P = 0.16$). Effect of yeast supplementation on RMY was similar for cows and goats but was greater for buffaloes (mean slopes = 1.09, 2.39, and 6.19 g/kg BW, respectively, $n_{exp} = 49, 5$ and 2 for cows, goats and buffaloes, respectively, $rmse = 2.09$, $P = 0.003$). Only two experiments were conducted on buffaloes and thus this result has to be interpreted cautiously, and it cannot be concluded that the effects of yeast supplementation is always greater in buffaloes than in other dairy ruminants.

Table 3. Meta-analysis of the dose effect of yeast expressed as $\log_{10}(1+(\text{CFU}/100 \text{ kg of BW}))$ on rumen parameters and organic matter digestibility

	nexp ¹	nt ²	Intercept	Slope	rmse	<i>P</i>	a ³
pH	94	234	6.30	+ 0.008	0.11	**	17.6
VFA (mM)	77	196	94.6	+ 0.42	6.56	*	14.3
Lactic acid (mg/L)	15	38	108.8	- 1.40	13.70	0.1	13.3
OM digestibility (%)	41	103	70.16	+ 0.16	1.43	**	9.8

¹ number of experiments

² number of treatments

³ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0

†*P* < 0.10; **P* < 0.05; ***P* < 0.01; *****P* < 0.001

Table 4. Effects of interfering factors on the dose effect of yeast supplementation on rumen parameters and organic matter digestibility

	nexp ²	Interfering factor ¹				Regression ³	rmse	<i>P</i>	a ⁴
		Mean	SD	Min	Max				
Rumen pH									
% Concentrate	67	51.3	26.59	0	100	+ 0.0001	0.03	**	6.0
NDF (% DM)	41	41.6	15.84	21.5	80.1	0.04 - 0.001	0.03	**	7.3
VFA (mM)									
% Concentrate	63	48.2	26.82	0	100	+ 0.005	1.2	†	6.3
OM digestibility (%)									
DMI	35	28.2	9.57	10.8	46.3	+ 0.008	0.43	**	0.0
% Concentrate	36	43.8	23.54	0	100	0.50 - 0.006	0.37	*	5.6
NDF (% DM)	24	48.9	18.69	21.5	80.1	+ 0.006	0.39	***	8.3
CP (% DM)	31	12.7	3.10	6.2	18.0	+ 0.014	0.39	*	9.7

¹ characteristics of the range available for the considered interfering factor: mean, standard deviation, minimum (Min) and maximum (Max)

² number of experiments

³ regression equation (intercept is only presented when $\neq 0.00$)

⁴ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0

†*P* < 0.10; **P* < 0.05; ***P* < 0.01; *****P* < 0.001

Table 5. Meta-analysis of the effect of yeast supplementation on intake and milk production

	nexp ¹	nt ²	Treatment ³		<i>P</i>	rmse	a ⁴
			Control	Yeast			
DMI (g/kg BW)	47	114	34.6	35.0	*	1.1	12.8
Raw Milk Yield (g/kg BW)	59	136	46.5	47.7	***	1.64	13.6
Milk Fat Content (%)	57	131	3.80	3.85	†	0.14	12.3
Milk Protein Content (%)	52	121	3.20	3.19	NS	0.07	17.3

¹ number of experiments² number of treatments³ lsmeans⁴ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0†*P* < 0.10; **P* < 0.05; ***P* < 0.01; ****P* < 0.001**Table 6.** Effects of interfering factors on the qualitative effect of yeast supplementation on intake and milk production

	Interfering factor ¹						rmse	<i>P</i>	a ⁴
	nexp ²	Mean	SD	Min	Max	Slope ³			
DMI (g/kg BW)									
% Concentrate	34	50.8	12.80	7.5	70.0	+ 0.011	1.58	*	8.8
Raw milk Yield (g/kg BW)									
DMI	46	34.9	4.52	25.1	43.8	+ 0.032	1.91	***	4.3
% Concentrate	40	50.9	12.62	7.5	70.0	+ 0.027	2.26	***	5.0
NDF (% DM)	19	34.1	5.32	26.2	46.5	+ 0.034	1.22	**	0.0
CP (% DM)	24	16.4	2.33	11.8	20.3	+ 0.065	1.30	**	4.2
Milk Fat Content (%)									
% Concentrate	39	51.3	12.51	7.50	70	+ 0.001	0.17	†	5.1

¹ characteristics of the range available for the considered interfering factor: mean, standard deviation, minimum (Min) and maximum (Max)² number of experiments³ regression slope (all the intercepts were = 0.00)⁴ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0†*P* < 0.10; **P* < 0.05; ***P* < 0.01; ****P* < 0.001

Table 7. Meta-analysis of the dose effect of yeast expressed as $\log_{10} (1+(\text{CFU}/100 \text{ kg of BW}))$ on intake and milk yield

	nexp ¹	nt ²	Intercept	Slope	rmse	<i>P</i>	a ³
DMI (g/kg BW)	42	110	34.21	+ 0.07	1.05	†	16.7
Raw Milk Yield (g/kg BW)	53	134	47.8	+ 0.21	1.59	***	11.3

¹ number of experiments

² number of treatments

³ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0

†*P* < 0.10; **P* < 0.05; ***P* < 0.01; ****P* < 0.001

Table 8. Effects of interfering factors on dose effect of yeast supplementation on milk yield

	Interfering factor ¹					Slope ³	rmse	<i>P</i>	a ⁴
	nexp ²	Mean	SD	Min	Max				
Raw Milk Yield (g/kg BW)									
DMI	40	34.6	4.66	25.1	43.8	+ 0.007	0.35	***	2.5
% Concentrate	36	50.4	12.77	7.5	70.0	+ 0.005	0.40	**	5.6
NDF (% DM)	17	34.5	5.39	26.2	16.5	+ 0.007	0.26	**	0.0
CP (% DM)	22	16.1	2.26	11.8	19.0	+ 0.016	0.29	**	4.5

¹ Characteristics of the range available for the considered interfering factor: mean, standard deviation, minimum (Min) and maximum (Max)

² number of experiments

³ regression slope (all the intercepts were = 0.00)

⁴ percentage of treatments which presented normalized residues larger than 2.0

†*P* < 0.10; **P* < 0.05; ***P* < 0.01; ****P* < 0.001

Influence of yeast supplementation on RMY increased with DMI ($P < 0.001$) and with the proportion of concentrate ($P < 0.001$), NDF ($P = 0.001$) and CP ($P = 0.001$) in the diet. Yeast effect on milk fat content was not influenced by the species ($P = 0.5$), the DMI ($P = 0.16$), dietary NDF ($P = 0.9$) or CP percentage ($P = 0.6$). It tended to be increased by the dietary concentrate percentage ($P = 0.099$).

Quantitative Analysis: Effect of Yeast Dose. Dry matter intake ($P = 0.069$) and RMY ($P < 0.001$) tended to increase linearly with yeast dose (Table 7). Milk fat and protein contents were not affected by yeast dose ($P > 0.10$).

Effect of yeast supplementation on DMI was neither influenced by the proportion of concentrate ($P = 0.13$), NDF ($P = 0.51$) or CP ($P = 0.53$) in the diet, or by ruminant species ($P = 0.31$). Only one experiment out of the two on buffaloes was included in the analysis of yeast dose effect on RMY, thus it was not included in the analyses of species effect. Effect of yeast supplementation on milk yield tended to be greater for goats than for cows (0.22 and 0.74 g / kg BW, respectively, $n = 47$ and 2, respectively, $rmse = 0.37$, $P = 0.60$, $a = 4.1 \%$), but only two experiments were available on goats. This result also has to be interpreted cautiously, and it cannot be concluded that the effects of yeast supplementation is always greater in dairy goats than in cattle. Influence of yeast supplementation on RMY increased with DMI ($P < 0.001$), proportion of concentrate ($P = 0.001$), NDF ($P = 0.001$) and CP ($P = 0.001$) in the diet (Table 8).

DISCUSSION

Even if in many papers yeast increased milk production (Robinson, 2002, Abd El-Ghani, 2004, Stella et al., 2007) and had an influence on many rumen fermentation characteristics (Erasmus et al., 1992, Robinson, 2002), results are inconsistent between different studies. This statement suggests that it could be possible to conclude either positive or negative effects of yeast supplementation for any given parameter depending upon the publications chosen. The authors cannot claim that the present analysis includes all research ever published on the supplementation of ruminant diets with yeasts but have tried to be as exhaustive as possible in reviewing literature. This current analysis of literature confirms the large variability in data between different papers, however given the large number of papers used in this analysis, the process of interpretation within-experiment allowed extraction of the significant influences of

yeast. Some difficulties were encountered during this analysis, these included incomplete datasets. Then, some experiments were only available as abstracts, posters, short communications form and data from some studies had not been published. This could induce a degree of bias in the meta-analysis because results that are not statistically significant are seldom presented in abstracts, posters or short communications. This may be for a variety of reasons which include abstracts presented as preliminary studies that have not been validated by publication in a scientific paper, or non-positive or non-significant results that have a lower probability of being published than positive or significant results. Twenty-one of the papers used in this analysis (five unpublished trials and 16 short papers) appeared to contain enough detail and were thus included in the dataset. Seven short papers were used in the rumen fermentation database, and 15 in the production database, but no effect of paper form (short papers vs. full papers) was detected in any of the parameters tested.

The method of meta-analysis that was employed in this analysis is now considered as the most suitable for this kind of study (St-Pierre, 2001, Sauvant et al., 2008). This method of statistical modeling has the major advantage of splitting variation among and within experiments. This paper is more complete than the one by Sauvant et al. (2004) for in vivo studies, and thus certainly leads to more reliable conclusions. A difficulty of meta-analysis on in vivo data is that experimental methodologies and conditions vary largely from one paper to another. A detailed analysis of some specific experimental factors which could explain, at least partly, the residual variations of the statistical analysis appeared thus necessary. The method of meta-analysis that we have used did not allow analyzing the interactions between yeast and experimental factors, but the authors have tried to quantify this issue by a separate analysis of the influence of some potentially interfering factors on the yeast effect observed per experiment. This analysis shows that the composition of the diet influences the effects of yeast supplementation on rumen and production parameters, which was not clear using only the few papers simultaneously analyzing yeast effect and dietary parameters. This is certainly due to the low number of papers available. Another issue in meta-analyses is the way in which outlier treatments and experiments are treated. In the present paper it was decided to discard the data which presented normalized residues greater than 3.0 and to calculate the proportion of data presenting normalized residues greater than 2.0.

Simultaneous analysis of qualitative and quantitative effects of yeast supplementation showed that results are mainly consistent between analyses, except for parameters showing a tendency towards qualitative effects of yeast supplementation but no dose effect. When a dose effect was detected our statistical design did not allow determination of an eventual asymptote

or maximum effect of yeast dose. Effects of interfering factors were also mainly consistent between the two analyses, even if fewer factors were significant for yeast dose effect. In particular DMI was always significant when analyzed on a qualitative basis but only significant for OM digestibility when analyzed on a dose effect basis. This is certainly because yeasts are often given in the diet and thus the level of yeast ingested is related to the level of DMI. In the qualitative analysis this effect of DMI might be confounded with yeast dose effect. Nonetheless these results show that both methods are accurate in determining the effects of yeast supplementation and factors that interfere with this effect. Thus, papers with no indication of CFU can be included in meta-analyses.

Yeast supplementation increased rumen pH, VFA concentration and organic matter digestibility and tended to decrease rumen lactate concentration. These results agree with the review of Robinson (2002) (14 experiments), which shows an average increase in pH (1.6 %), an overall increase in total rumen VFA (5.4 %) and an overall decrease in lactate concentration (8.1 %). However Lescoat et al. (2000), in their review using 40 papers, did not observe any influence of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on rumen pH or organic matter digestibility but observed a greater increase in VFA concentration (+ 4.8 mmol / l) than the one observed in the present analysis (+ 2.1 mmol / l). In addition Sauviant et al. (2004), in a review using 78 experiments, did not observe any influence of yeast supplementation on rumen pH or VFA concentration, and only observed a tendency toward increase in OM digestibility (+ 0.5 %). This value is however similar to the one obtained in the present analysis (+ 0.8 %). Using the 157 experiments of this current meta-analysis certainly leads to more reliable statistical conclusions, even if all 157 experiments were not used for all the presented results. In this current meta-analysis both rumen pH and VFA concentration are increased by yeast supplementation, and there was a tendency for lactic acid to be reduced. These results indicate that yeasts are able to limit the drop in rumen pH, which is usually linked to an increase in VFA. This confirms the observations of Giger-Reverdin et al. (2004) who observed an increase in the rumen buffering capacity of yeast supplemented goats. Furthermore yeasts were able to limit lactic acid production or accumulation in the rumen, but this effect was at the limit of the level of significance and more data might be necessary to definitively conclude this point. This decrease in lactic acid is however in agreement with the results of Chaucheyras-Durand and Fonty (2002). No influence of yeast was determined on the acetate to propionate ratio which is coherent with the meta-analysis of Sauviant et al. (2004). This indicates that increases in total VFA concentrations might be more a

consequence of a global increase in fermentation processes per se rather than to modification of fermentation resulting in the production of acetic or propionic acids.

Dry matter intake and RMY were increased by yeast supplementation, which again is in agreement with the review of Robinson (2002) and the analysis of Ali-Haimoud-Lekhal et al. (1999), but the latter group observed a significant increase (+ 1.3 kg per cow per day) only in early lactation. As physiological status was not always available in our dataset, we could not test this hypothesis. The increase in milk yield observed by Ali-Haimoud-Lekhal et al. (1999) was far more important than the one observed in the present analysis (+1.2 g /kg BW). This might be due to the use of dairy animals in early and late lactation in the present paper. However, the present result suggests an overall increase in milk yield whatever the lactating state, and the lack of influence observed by Ali-Haimoud-Lekhal et al. (1999) might be due to the smaller number of experiments used. This increase in RMY is also in agreement with a study regrouping 22 experiments and showing an average increase in milk production of 7.3 % for yeast supplemented animals, even if this increase was often not significant (Jouany, 1999). However, Sauvant et al. (2004) only observed a tendency toward increased raw milk yield but no effect on DMI in their meta-analysis. Very little influence of yeast was observed on milk composition, only milk fat content tended to be increased by yeast supplementation, but this result was only observed for the qualitative effects of yeast supplementation. This is in agreement with previous analysis showing very little or inconsistent effects of yeast supplementation on milk composition (Ali-Haimoud-Lekhal et al., 1999, Robinson, 2002, Sauvant et al., 2004). The increase in milk production, usually observed when increasing dietary concentrate percentage, is often linked to a decrease in milk fat content. The current analysis shows that yeast supplementation increased milk yield without any significant effect on milk composition. Only eight papers compared two types of yeast and only three of these compared the same yeast products. Thus our dataset was unable to allow testing of the different types of yeast used.

Most of the interfering factors tested influenced animal response to yeast supplementation. This result suggests that many other factors (not available in our database) might enhance or limit the effects of yeast supplementation on rumen fermentation, intake or production traits. Other dietary characteristics (starch content, net energy, physically effective fiber...), physiological state (Ali-Haimoud-Lekhal et al., 1999), or management practices (Jouany, 1999, Beauchemin et al., 2003) might have to be tested. When DMI is analyzed as an interfering factor it is more often significant in the qualitative analysis than with the quantitative effects of a dose effect one, which has already been discussed. This statement is

particularly relevant for RMY analysis as yeast effect on RMY is significantly enhanced when DMI increases (for both qualitative and dose effect analysis). Finally it is not possible with our analysis to determine if the increase in RMY is a result of increased DMI, a physiological effect of yeast supplementation on milk production mechanisms, or a combination of both. Only the qualitative analysis of the effects of yeast supplementation on DMI was influenced by an interfering factor; the proportion of concentrate in the diet. When the dose effect is taken into account none of the interfering factors could explain the variability observed, which could be due to the correlation between yeast dose and DMI when yeasts are incorporated in the diet. Differences in DMI can also be due to decreases in intake of control animals or to sub-clinical acidosis with high concentrate diets. This might also indicate that other factors might interfere with the effects of yeast supplementation for this parameter. All these statements and questions confirm that DMI is a very important factor in ruminant production and digestion and that its effect cannot be easily dissociated from the effects of yeast supplementation.

For all the rumen fermentation characteristics influenced by yeast supplementation, effects are influenced by at least one of the dietary characteristics (proportion of concentrate, NDF or CP in the diet). The proportion of concentrate in the diet always interacted with the effects of yeast supplementation; it enhanced the effects of yeast supplementation on pH, VFA concentration, DMI, RMY and milk fat content, but limited the effects of yeast supplementation on OM digestibility and lactic acid concentration. Thus, except for these last two parameters these results agree with previous observations showing that the influence of yeast supplementation on rumen parameters is greatest when using high concentrate diets (Erasmus et al., 1992, Kung et al., 1997, Jouany, 1999) or with diets or feeding systems that degrade cellulolysis the most (Williams et al., 1991). This last statement is confirmed by rumen pH because increased proportion of NDF in the diet limited the effects of yeast for both qualitative and dose effect analysis. This is obviously coherent with the fact that high concentrate diets are commensurate with low levels of NDF in the diet. This is however not observed for other parameters (VFA concentration, OM digestibility and RMY). For these parameters, increasing dietary NDF enhances the effects of yeast supplementation. This increased effect in high NDF diets is certainly due to an increase in cellulolysis or the number of cellulolytic bacteria (Harrison et al., 1988), and yeast effect on rumen VFA seemed to be greater in high concentrate or high NDF diets than in intermediate ones. Crude protein was often the least significant interfering factor, showing that there might be fewer interactions between yeasts and nitrogen than between yeasts and concentrates or NDF. Nonetheless, all

these results confirm that a number of factors can explain, at least partly, the high variability observed between experiments and it is obvious that many other experimental parameters might have to be tested in such databases to determine more precisely in which conditions yeasts are the most effective.

CONCLUSION

The meta-analysis of over 110 papers and 157 experiments showed that yeast supplementation increased dry matter intake, raw milk yield, rumen pH, rumen volatile fatty acid concentration and organic matter digestibility. It also indicated that dietary yeast supplementation tended to decrease rumen lactic acid concentration but had no effect on milk composition or rumen acetate to propionate ratio. For all parameters, with the exception of OM digestibility, yeast influence was greater in animals with high levels of intake or offered high concentrate diets.

Despite the number of papers used and the use of meta-analysis as a powerful statistical tool, all the issues discussed show that results have to be considered cautiously as they are highly dependant upon the dataset and the methodology used. Nonetheless, this analysis shows that both qualitative and dose effect approaches were relevant and showed similar results thus indicating that papers which do not include the CFU within their results can be included in meta-analyses.

AKNOLEWDGEMENTS

The authors would like to thank Alltech France for providing access to unpublished data of their internal trials, and to abstracts and posters from their annual symposia.

REFERENCES

- Abd El-Ghani, A. A. 2004. Influence of diet supplementation with yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on performance of Zaraibi goats. *Small Rumin. Res.* 52: 223-229.
- Ali-Haimoud-Lekhal, D., P. Lescoat, C. Bayourthe, and R. Moncoulon. 1999. Effets de *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus oryzae* sur les performances zootechniques

- chez la vache laitière : étude bibliographique. Page 157 in 6^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris.
- Beauchemin, K. A., W. Z. Yang, D. P. Morgavi, G. R. Ghorbani, W. Kautz, and J. A. Z. Leedle. 2003. Effects of bacterial direct-fed microbials and yeast on site and extent of digestion, blood chemistry, and subclinical ruminal acidosis in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81: 1628-1640.
- Chaucheyras-Durand, F. and G. Fonty. 2002. Yeasts in ruminant nutrition. Experiences with a live yeast product. *Kraftfutter.* 85: 146-150.
- Dawson, K. A. 2000. Some milestones in our understanding of yeast culture supplementation in ruminants and their implications in animal production systems. Pages 473-486 in Alltech's 16th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Erasmus, L. J., P. M. Botha, and A. Kistner. 1992. Effect of yeast culture supplement on production, rumen fermentation, and duodenal nitrogen flow in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 75: 3056-3065.
- Fulton, W. R., T. J. Klopfenstein, and R. A. Britton. 1979. Adaptation to high concentrate diets by beef cattle. 2. Effect of ruminal pH alteration on rumen fermentation and voluntary intake of wheat diets. *J. Anim. Sci.* 49: 785-789.
- Giger-Reverdin, S., G. Bertin, J. Tessier, and D. Sauvant. 2004. Effet d'une levure (*Saccharomyces Cerevisiae* CBS 493.94) sur le métabolisme ruminal de la chèvre laitière. Page 265 in 11^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France.
- Harrison, G. A., R. W. Hemken, K. A. Dawson, R. J. Harmon, and K. B. Barker. 1988. Influence of addition of yeast culture supplement to diets of lactating cows on ruminal fermentation and microbial populations. *J. Dairy Sci.* 71: 2967-2975.
- Jouany, J. P. 1999. Twenty years of research into yeast culture, now a standard in ruminant diets around the World. Pages 44-68 in Alltech's 15th Annual European, Middle Eastern and African Lecture Tour. Responding to a changing agricultural landscape, Lexington, KY, USA.
- Jouany, J.-P. 2001. A new look at yeast cultures as probiotics for ruminants. *Feed Mix.* 9: 17-19.
- Kleen, J. L., G. A. Hooijer, J. Rehage, and J. P. T. M. Noordhuizen. 2003. Subacute ruminal acidosis (SARA): a review. *J. Vet. Med. Ser. A.* 50: 406-414.

- Kung, L., E. M. Kreck, R. S. Tung, A. O. Hession, A. C. Sheperd, M. A. Cohen, H. E. Swain, and J. A. Z. Leedle. 1997. Effects of a live yeast culture and enzymes on *in vitro* ruminal fermentation and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 80: 2045-2051.
- Lescoat, P., D. Ali-Haimoud-Lekhal, and C. Bayourthe. 2000. Effets de *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus Oryzae* sur la digestion et le fonctionnement ruminal : étude bibliographique. Page 199 in 7^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France.
- Martin, C., L. Brossard, and M. Doreau. 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *Prod. Anim.* 19: 93-108.
- Owens, F. N., D. S. Secrist, W. J. Hill, and D. R. Gill. 1998. Acidosis in cattle: A review. *J. Anim. Sci.* 76: 275-286.
- Robinson, P. H. 2002. Yeast products for growing and lactating dairy cattle: impacts on rumen fermentation and performance. in XII International Meeting on milk and meat production in hot climates, Mexicali, Mexico.
- Sauvant, D., F. Meschy, and D. Mertens. 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *Prod. Anim.* 12: 49-60.
- Sauvant, D., S. Giger-Reverdin, and P. Schmidely. 2004. Rumen acidosis: modeling ruminant response to yeast culture. Pages 221-229 in Alltech's 20th Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry. Re-imagining the feed industry. T. P. Lyons and K. A. Jacques, eds. Nottingham University Press.
- Sauvant, D., S. Giger-Reverdin, and F. Meschy. 2006. Le contrôle de l'acidose ruminale latente. *Prod. Anim.* 19: 69-78.
- Sauvant, D., P. Schmidely, J. Daudin, and N. R. St-Pierre. 2008. Meta-analyses of Experimental Data in Animal Nutrition. *Animal* (in press)
- Stella, A. V., R. Paratte, L. Valnegri, G. Cigalino, G. Soncini, E. Chevaux, V. Dell'Orto, and G. Savoini. 2007. Effect of administration of live *Saccharomyces cerevisiae* on milk production, milk composition, blood metabolites, and faecal flora in early lactating dairy goats. *Small Rumin. Res.* 67: 7-13.
- St-Pierre, N. R. 2001. Integrating quantitative findings from multiple studies using mixed model methodology. *J. Dairy Sci.* 84: 741-755.
- Williams, P. E., C. A. Tait, G. M. Innes, and C. J. Newbold. 1991. Effects of the inclusion of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* plus growth medium) in the diet of dairy cows on milk yield and forage degradation and fermentation patterns in the rumen of steers. *J. Anim. Sci.* 69: 3016-3026.

REFERENCES USED FOR META-ANALYSIS

- Abd El-Ghani, A. A. 2004. Influence of diet supplementation with yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on performance of Zaraibi goats. *Small Rumin. Res.* 52: 223-229.
- Adamovic, M. 1998. The influence of Yea-Sacc¹⁰²⁶ on milk production, milk composition and physiology of food digestion in dairy cows during mid-lactation (poster). in Alltech's 14th annual Symposium of Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Adams, A. L., B. Harris, Jr., H. H. Van Horn, and C. J. Wilcox. 1995. Effects of varying forage types on milk production responses to whole cottonseed, tallow, and yeast. *J. Dairy Sci.* 78: 573-581.
- Adams, D. C., M. L. Galyean, H. E. Kiesling, J. D. Wallace, and M. D. Finkner. 1981. Influence of viable yeast culture, sodium bicarbonate and monensin on liquid dilution rate, rumen fermentation and feedlot performance of growing steers and digestibility in lambs. *J. Anim. Sci.* 53: 780-789.
- Ali-Haimoud-Lekhal, A. D. and E. Chevaux. 2003. Effet d'un apport de Levucell SC dans l'alimentation de la vache laitière sur la production et sur la composition du lait. Page 391 in 10^{ème} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris- France.
- Alshaikh, M. A., M. Y. Alsiadi, S. M. Zahran, H. H. Mogawer, and T. A. Aalshowime. 2002. Effect of feeding yeast culture from different sources on the performance of lactating Holstein cows in Saudi Arabia. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 15: 352-356.
- Andrighetto, I., L. Bailoni, G. Cozzi, and P. Berzaghi. 1993. Effects of yeast culture addition on digestion in sheep fed a high concentrate diet. *Small Rumin. Res.* 12: 27-34.
- Angeles, S. C., G. D. Mendoza, M. A. Cobos, M. M. Crosby, and F. A. Castrejon. 1998. Comparison of two commercial yeast cultures (*Saccharomyces cerevisiae*) on ruminal fermentation and digestion in sheep fed on corn-stover diet. *Small Rumin. Res.* 31: 45-50.
- Arakaki, L. C., R. C. Stahringer, J. E. Garrett, and B. A. Dehority. 2000. The effects of feeding monensin and yeast culture, alone or in combination, on the concentration and generic composition of rumen protozoa in steers fed on low-quality pasture supplemented with increasing levels of concentrate. *Anim. Feed Sci. Technol.* 84: 121-127.

- Arambel, M. J. and B. A. Kent. 1990. Effect of yeast culture on nutrient digestibility and milk yield response in early- to midlactation dairy cows. *J. Dairy Sci.* 73: 1560-1563.
- Arcos-Garcia, J. L., F. A. Castrejon, G. D. Mendoza, and E. P. Perez-Gavilan. 2000. Effect of two commercial yeast cultures with *Saccharomyces cerevisiae* on ruminal fermentation and digestion in sheep fed sugar cane tops. *Livest. Prod. Sci.* 63: 153-157.
- Aydin, C., N. Galip, K. Yaman, F. Cengiz, I. I. Turkmen, and H. Biricik. 2003. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* live yeast culture on ruminal metabolites and protozoa in male Kivircik yearlings fed a high forage and concentrate diet. *Turk. vet. hayvanc. derg.* 27: 1433-1440.
- Bach, A., C. Iglesias, and M. Devant. 2007. Daily rumen pH pattern of loose-housed dairy cattle as affected by feeding pattern and live yeast supplementation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 136: 146-153.
- Baumann, T. A., A. E. Radunz, G. P. Lardy, V. L. Anderson, J. S. Caton, and M. L. Bauer. 2004. Effects of tempering and a yeast-enzyme mixture on intake, ruminal fermentation, in situ disappearance, performance, and carcass traits in steers fed barley-based diets. *Prof. Anim. Sci.* 20: 178-184.
- Beauchemin, K. A., W. Z. Yang, D. P. Morgavi, G. R. Ghorbani, W. Kautz, and J. A. Z. Leedle. 2003. Effects of bacterial direct-fed microbials and yeast on site and extent of digestion, blood chemistry, and subclinical ruminal acidosis in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81: 1628-1640.
- Bertin, G. and S. Andrieu. 2005. Effect of yeast culture (Yea-Sac^(R)1026) supplementation on performance of high producing dairy cows (poster). in Alltech's 21st annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Besong, S., J. A. Jackson, C. L. Hicks, and R. W. Hemken. 1996. Effects of a supplemental liquid yeast product on feed intake, ruminal profiles, and yield, composition, and organoleptic characteristics of milk from lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 79: 1654-1658.
- Biricik, H. and H. M. Yavuz. 2001. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* yeast culture on milk production, milk composition and some rumen and blood parameters of dairy cows. *J. Facul. Vet. Med.* 19: 9-17.
- Carro, M. D., P. Lebzien, and K. Rohr. 1992. Effects of yeast culture on rumen fermentation, digestibility and duodenal flow in dairy cows fed a silage based diet. *Livest. Prod. Sci.* 32: 219-229.

- Chademana, I. and N. W. Offer. 1990. The effect of dietary inclusion of yeast culture on digestion in the sheep. *Anim. Prod.* 50: 483-489.
- Chiquette, J. 1995. *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae*, used alone or in combination, as a feed supplement for beef and dairy cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 75: 405-415.
- Corona, L., G. D. Mendoza, F. A. Castrejon, M. M. Crosby, and M. A. Cobos. 1999. Evaluation of two yeast cultures (*Saccharomyces cerevisiae*) on ruminal fermentation and digestion in sheep fed a corn stover diet. *Small Rumin. Res.* 31: 209-214.
- Dann, H. M., J. K. Drackley, G. C. McCoy, M. F. Hutjens, and J. E. Garrett. 2000. Effects of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on prepartum intake and postpartum intake and milk production of jersey cows. *J. Dairy Sci.* 83: 123-127.
- Dawson, K. A., K. E. Newman, and J. A. Boling. 1990. Effects of microbial supplements containing yeast and lactobacilli on roughage-fed ruminal microbial activities. *J. Anim. Sci.* 68: 3392-3398.
- De Queiroz, R. C., A. F. Bergamaschine, J. F. P. Bastos, P. C. d. Santos, and G. C. Lemos. 2004. Use of enzymes and yeast in the cattle diet: nutrient digestibility and performance in feedlots. *R. Bras. Zootec.* 33: 1548-1556.
- Dehghan, M. B., A. N. Khah, and A. Zali. 2003. Effects of feeding yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) on productive performance and blood components of lactating holstein dairy cows. Page 106 in *Proc. Br. Soc. Anim. Sci.*
- Dobos, R. C., A. J. Dickens, and T. J. Norris. 1989. Yea-Sacc for dairy cattle in low concentrate input systems: effects on milk yield and composition in an Australian experiment. Alltech (internal communication).
- Dolezal, P., J. Dolezal, and J. Trinacty. 2005. The effect of *Saccharomyces cerevisiae* on ruminal fermentation in dairy cows. *Czech J. Anim. Sci.* 50: 503.
- Doreau, M. and J. P. Jouany. 1998. Effect of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on nutrient digestion in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81: 3214-3221.
- El-Hassan, S. M., C. J. Newbold, I. E. Edwards, J. H. Topps, and R. J. Wallace. 1996. Effect of yeast culture on rumen fermentation, microbial protein flow from the rumen and live-weight gain in bulls given high cereal diets. *Anim. Sci.* 62: 43-48.
- El-Nor, S. A. H. A. and A. M. Kholif. 1998. Effect of supplementation of live yeast culture in the diet on the productive performance of lactating buffaloes. *Milchwissenschaft - Milk Sci. Int.* 53: 663-666.

- El-Waziry, A. M., H. E. M. Kamel, and M. H. M. Yacout. 2000. Effect of bakers' yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation to berseem (*Trifolium Alexandrinum*) hay diet on protein digestion and rumen fermentation of sheep. *Egypt. J. Nutr. Feeds.* 3: 71-82.
- Enjalbert, F., J. E. Garrett, R. Moncoulon, C. Bayourthe, and P. Chicoteau. 1999. Effects of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on ruminal digestion in non-lactating dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 76: 195-206.
- Erasmus, L. J., P. M. Botha, and A. Kistner. 1992. Effect of yeast culture supplement on production, rumen fermentation, and duodenal nitrogen flow in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 75: 3056-3065.
- Erasmus, L. J., P. H. Robinson, A. Ahmadi, R. Hinders, and J. E. Garrett. 2005. Influence of prepartum and postpartum supplementation of a yeast culture and monensin, or both, on ruminal fermentation and performance of multiparous dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 122: 219-239.
- Erdman, R. A. and B. K. Sharma. 1989. Effect of yeast culture and sodium bicarbonate on milk yield and composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 72: 1929-1932.
- Fiems, L. O., B. G. Cottyn, and C. V. Boucque. 1995. Effect of yeast supplementation on health, performance and rumen fermentation in beef bulls. *Arch. Anim. Nutr.* 47: 295-300.
- Flachowsky, G., K. Tiroke, and M. Matthey. 1993. Influence of yeast (*Saccharomyces cerevisiae* as Yea-Sacc or Levaferm) on in sacco dry matter degradability and ruminal parameters of variously fed small ruminants. *Arch. Anim. Nutr.* 42: 159-169.
- Galip, N. 2006a. Effects of dietary *Saccharomyces cerevisiae* live yeast culture supplementation on ruminal digestion and protozoa count in rams fed with diets with low or high ratio forage/concentrate. *Rev. Med. Vet.* 157: 607-611.
- Galip, N. 2006b. Effect of supplemental yeast culture and sodium bicarbonate on ruminal fermentation and blood variables in rams. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 90: 446-452.
- Galip, N. 2006c. Effect of supplemental yeast culture on ruminal protozoa and blood parameters in rams. *Rev. Med. Vet.* 157: 519-524.
- Garcia, C. C. G., M. G. D. Mendoza, M. S. Gonzalez, P. M. Cobos, C. M. E. Ortega, and L. R. Ramirez. 2000. Effect of a yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) and monensin on ruminal fermentation and digestion in sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 83: 165-170.
- Garza-Cazares, F., P. Lebzien, and G. Flachowsky. 2001. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* on in sacco dry matter degradability and parameters of rumen fermentation in sheep. in

- Vitamine und Zusatzstoffe in der Ernährung von Mensch und Tier. 8. Symposium, 26 und 27 September, 2001, Jena/Thuringen, Germany.
- Giger-Reverdin, S., N. Bezault, D. Sauvant, and G. Bertin. 1996. Effects of a probiotic yeast in lactating ruminants: interaction with dietary nitrogen level. *Anim. Feed Sci. Technol.* 63: 149-162.
- Giger-Reverdin, S., D. Sauvant, J. Tessier, G. Bertin, and P. Morand-Fehr. 2004. Effect of live yeast culture supplementation on rumen fermentation in lactating dairy goats. *S. Afri. J. Anim. Sci.* 34 (Suppl. 1): 59-61.
- Günther, K. D. 1988. Effect of Yea-Sacc on milk yield, composition and feed intake of dairy cows. Alltech (internal communication).
- Haddad, S. G. and S. N. Goussous. 2005. Effect of yeast culture supplementation on nutrient intake, digestibility and growth performance of Awassi lambs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 118: 343-348.
- Hadjipanayiotou, M., I. Antoniou, and A. Photiou. 1997. Effects of the inclusion of yeast culture on the performance of dairy ewes and goats and the degradation of feedstuffs. *Livest. Prod. Sci.* 48: 129-134.
- Harris, B., Jr., D. E. Dorminey, W. A. Smith, H. H. Van Horn, and C. J. Wilcox. 1992. The effect of Yea-Sacc supplementation on milk yield and composition under large herd management conditions. *J. Dairy Sci.* 75 (Suppl. 1): 313.
- Harrison, G. A., R. W. Hemken, K. A. Dawson, R. J. Harmon, and K. B. Barker. 1988. Influence of addition of yeast culture supplement to diets of lactating cows on ruminal fermentation and microbial populations. *J. Dairy Sci.* 71: 2967-2975.
- Henics, Z. and S. Gombos. 1991. Effects of Yeast culture on milk production, feed digestibility and ruminal fermentation of dairy cattle (poster). in Alltech's 7th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Huber, J. T., J. Sullivan, and B. Taylor. 1988. Effect of feeding Yea-Sacc on Milk Production and Related Responses in a Commercial Dairy Herd in Arizona. Pages 35-38 in Alltech's 5th annual symposium on Biotechnology in the Feed Industry,
- Huhtanen, P. 1991. Effects of yeast culture supplement on digestion of nutrients and rumen fermentation in cattle fed on grass silage barley diet. *J. Agric. Sci. Finl.* 63: 443-453.
- José, M. V. and R. R. 2000. Effect of Yea-Sacc supplementation on milk production and post-partum reproductive behavior in dairy cattle. Alltech (internal communication).
- Jouany, J. P., F. Mathieu, J. Senaud, J. Bohatier, G. Bertin, and M. Mercier. 1998. The effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on the digestion of the cell wall

- fraction of a mixed diet in defaunated and refaunated sheep rumen. *Reprod. Nutr. Dev.* 38: 401-416.
- Kamalamma, U. Krishnamoorthy, and P. Krishnappa. 1996. Effect of feeding yeast culture (Yea-Sacc1026) on rumen fermentation in vitro and production performance in crossbred dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 57: 247-256.
- Kampf, D., A. Raasch, P. Möckel, and G. Flachowsky. 1997. Einfluss lebender Hefezellen auf Kennzahlen der Pansenfermentation und den in sacco Trockensubstanzabbau von Weizenstroh und Luzerneheu bei nicht laktierenden Kühen. Pages 482-485 in *Vitamine und Zusatzstoffe in der Ernährung von Mensch und Tier*, Jena, Thüringen, Germany.
- Karr, K. J., K. R. McLeod, K. A. Dawson, R. E. Tucker, and G. E. Mitchell. 1991. Influence of yeast culture and/or monensin on nitrogen flow and rumen fermentation in sheep (poster). in *Alltech's 7th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry*, Lexington, KY, USA.
- Kawas, J. R., R. Garcia-Castillo, H. Fimbres-Durazo, F. Garza-Cazares, J. F. G. Hernandez-Vidal, E. Olivares-Saenz, and C. D. Lu. 2007. Effects of sodium bicarbonate and yeast on nutrient intake, digestibility, and ruminal fermentation of light-weight lambs fed finishing diets. *Small Rumin. Res.* 67: 149-156.
- Khadem, A. A., M. Pahlavan, A. Afzalzadeh, and M. Rezaeian. 2007. Effects of live yeast *Saccharomyces cerevisiae* on fermentation parameters and microbial populations of rumen, total tract digestibility of diet nutrients and on the in situ degradability of alfalfa hay in Iranian Chall sheep. *Pak. J. Biol. Sci.* 10: 590-597.
- Kim, D. Y., M. R. Figueroa, D. P. Dawson, C. E. Batallas, M. J. Arambel, and J. L. Walters. 1992a. Efficacy of supplemental viable yeast culture with or without *Aspergillus oryzae* on nutrient digestibility and milk production in early to midlactation dairy cows (abstract). Alltech (internal communication).
- Kim, D. Y., B. A. Kent, M. R. Figueroa, D. P. Dawson, C. E. Batallas, M. J. Arambel, and J. L. Walters. 1992b. Effect of added yeast culture with or without *Aspergillus oryzae* on rumen fermentation and nutrient digestibility when fed to nonlactating holstein cows (abstract). Alltech (internal communication).
- Kobayashi, T. and H. Itabashi. 1995. Effects of yeast culture on milk protein yield, ruminal fermentation and blood measurements in early and mid-lactation cows (poster). in *Alltech's 11th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry*, Lexington, KY, USA.

- Koul, V., U. Kumar, V. K. Sareen, and S. Singh. 1998. Mode of action of yeast culture (YEA-SACC 1026) for stimulation of rumen fermentation in buffalo calves. *J. Sci. Food Agric.* 77: 407-413.
- Kumar, U., K. V.K., and S. Singh. 1992. A note on the effect of supplementation of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* plus growth medium) in the diet of buffaloes on milk yield and composition. *Anim. Prod.* 55: 440-442.
- Kumar, U., V. K. Sareen, and S. Singh. 1994. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* yeast culture supplement on ruminal metabolism in buffalo calves given a high concentrate diet. *Anim. Prod.* 59: 209-215.
- Kung, L., Jr., E. M. Kreck, R. S. Tung, A. O. Hession, A. C. Sheperd, M. A. Cohen, H. E. Swain, and J. A. Z. Leedle. 1997. Effects of a live yeast culture and enzymes on *in vitro* ruminal fermentation and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 80: 2045-2051.
- Lodge, S., T. J. Klopfenstein, R. Stock, and D. Herold. 1996. Use of direct fed microbials to alleviate subacute acidosis. *Nebr. Beef Rep.*: 66-67.
- Malcolm, K. J. and H. E. Kiesling. 1990. Effects of whole cottonseed and live yeast culture on ruminal fermentation and fluid passage rate in steers. *J. Anim. Sci.* 68: 1965-1970.
- Mathieu, F., J. P. Jouany, J. Senaud, J. Bohatier, G. Bertin, and M. Mercier. 1996. The effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on fermentations in the rumen of faunated and defaunated sheep; protozoal and probiotic interactions. *Reprod. Nutr. Dev.* 36: 271-287.
- Michalet-Doreau, B. and D. Morand. 1996. Effect of yeast culture, *Saccharomyces cerevisiae*, on ruminal fermentation during adaptation to high concentrate feeding. *Ann. Zootech.* 45 (suppl.): 337.
- Mir, Z. and P. S. Mir. 1994. Effect of the addition of live yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) on growth and carcass quality of steers fed high-forage or high-grain diets and on feed digestibility and *in situ* degradability. *J. Anim. Sci.* 72: 537-545.
- Miranda, R. L. A., M. G. D. Mendoza, J. R. Barcena-Gama, M. S. S. Gonzalez, R. Ferrara, C. M. E. Ortega, and P. M. A. Cobos. 1996. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* or *Aspergillus oryzae* cultures and NDF level on parameters of ruminal fermentation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 63: 289-296.
- Moloney, A. P. and M. J. Drennan. 1994. The influence of the basal diet on the effects of yeast culture on ruminal fermentation and digestibility in steers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 50: 55-73.

- Mpofu, I. D. T. and L. R. Ndlovu. 1994. The potential of yeast and natural fungi for enhancing fibre digestibility fo forages and roughage. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48: 39-47.
- Mutsvangwa, T., I. E. Edwards, J. H. Topps, and G. F. M. Paterson. 1992. The effect of dietary inclusion of yeast culture (Yea-Sacc) on patterns of rumen fermentation, food intake and growth of intensively fed bulls. *Anim. Prod.* 55: 35-40.
- Newbold, C. J., R. J. Wallace, X. B. Chen, and F. M. McIntosh. 1995. Different strains of *Saccharomyces cerevisiae* differ in their effects on ruminal bacterial numbers *in vitro* and in sheep. *J. Anim. Sci.* 73: 1811-1818.
- Newbold, C. J., R. J. Wallace, and F. M. McIntosh. 1996. Mode of action of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* as a feed additive for ruminants. *Br. J. Nutr.* 76: 249-261.
- Nocek, J. E., W. P. Kautz, J. A. Z. Leedle, and J. G. Allman. 2002. Ruminal supplementation of direct-fed microbials on diurnal pH variation and in situ digestion in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 85: 429-433.
- Oetzel, G. R., K. M. Emery, W. P. Kautz, and J. E. Nocek. 2007. Direct-fed microbial supplementation and health and performance of pre- and postpartum dairy cattle: a field trial. *J. Dairy Sci.* 90: 2058-2068.
- Olson, K. C., J. S. Caton, D. R. Kirby, and P. L. Norton. 1994a. Influence of yeast culture supplementation and advancing season on steers grazing mixed-grass prairie in the northern great plains. 2. Ruminal fermentation, site of digestion, and microbial efficiency. *J. Anim. Sci.* 72: 2158-2170.
- Olson, K. C., J. S. Caton, D. R. Kirby, and P. L. Norton. 1994b. Influence of yeast culture supplementation and advancing season on steers grazing mixed-grass prairie in the northern great plains. 1. Dietary composition, intake, and in situ nutrient disappearance. *J. Anim. Sci.* 72: 2149-2157.
- Pitamic, S., U. Pestevek, and J. Zust. 1994. The influence of yeast culture addition in ration of dairy cows in postpartal period on energy balance, rumen fermentation and milk production (poster). in Alltech's 10th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Piva, G., S. Belladonna, G. Fusconi, and F. Sicbaldi. 1993. Effects of yeast on dairy cow performance, ruminal fermentation, blood components, and milk manufacturing properties. *J. Dairy Sci.* 76: 2717-2722.

- Plata, P. F., G. D. Mendoza M, J. R. Barcena-Gama, and S. Gonzalez M. 1994. Effect of a yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on neutral detergent fiber digestion in steers fed oat straw based diets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 49: 203-210.
- Preissinger, W., A. Maierhofer, and A. Obermaier. 2004. Effect of Yeast Culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on nutrient digestibility, feed intake and milk yield response in simmental dairy cows (poster). in Alltech's 20th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Putnam, D. E., C. G. Schwab, M. T. Socha, N. L. Whitehouse, N. A. Kierstead, and B. D. Garthwaite. 1997. Effect of yeast culture in the diets of early lactation dairy cows on ruminal fermentation and passage of nitrogen fractions and amino acids to the small intestine. *J. Dairy Sci.* 80: 374-384.
- Quigley, J. D., III, L. B. Wallis, H. H. Dowlen, and R. N. Heitmann. 1992. Sodium bicarbonate and yeast culture effects on ruminal fermentation, growth, and intake in dairy calves. *J. Dairy Sci.* 75: 3531-3538.
- Quinonez, J. A., L. J. Bush, T. Nalsen, and G. D. Adams. 1988. Effect of yeast culture on intake and production of dairy cows fed high wheat rations. *Animal Science Research Report*. Agricultural Experiment Station, Oklahoma State University.
- Roa, V. M. L., J. R. Barcena-Gama, M. S. Gonzalez, M. G. Mendoza, C. M. E. Ortega, and B. C. Garcia. 1997. Effect of fiber source and a yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*1026) on digestion and the environment in the rumen of cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 64: 327-336.
- Robinson, P. H. and J. E. Garrett. 1999. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on adaptation of cows to postpartum diets and on lactational performance. *J. Anim. Sci.* 77: 988-999.
- Rouzbehan, Y., H. Galbraith, J. A. Rooke, and J. G. Perrott. 1994. A note on the effects of dietary inclusion of a yeast culture on growth and ruminal metabolism of lambs given diets containing unground pelleted molassed dried sugar-beet pulp and barley in various proportions. *Anim. Prod.* 59: 147-150.
- Schingoethe, D. J., K. N. Linke, K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, D. R. Rennich, and I. Yoon. 2004. Feed efficiency of mid-lactation dairy cows fed yeast culture during summer. *J. Dairy Sci.* 87: 4178-4181.
- Semptey, F. 1991. Effect of Yea-Sacc^(R)1026 on degradability of feedstuffs for ruminants (poster). in Alltech's 7th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.

- Sinclair, L. A., K. A. Ranson, S. J. Ames, and D. Wilde. 2006. The effect of including a yeast culture on the intake performance of high yielding dairy cows fed a diet high in starch. Page 125 in Proc. Br. Soc. Anim. Sci.
- Skorko-Sajko, H., J. Sajko, and W. Zalewski. 1993. The effect of yea-Sacc1026 in the ration for dairy cows on production and composition of milk. J. Anim. Feed Sci. 2: 159-167.
- Smith, W. A., B. Harris, Jr., H. H. Van Horn, and C. J. Wilcox. 1993. Effects of forage type on production of dairy cows supplemented with whole cottonseed, tallow, and yeast. J. Dairy Sci. 76: 205-215.
- Sobhani, R., S., R. Valizadeh, and A. A. Nasserian. 2004. Effect of yeast culture on feed intake and productive performance of lactating dairy cows fed on barley silage based diets. Page 172 in Proc. Br. Soc. Anim. Sci.
- Soder, K. J. and L. A. Holden. 1999. Dry matter intake and milk yield and composition of cows fed yeast prepartum and postpartum. J. Dairy Sci. 82: 605-610.
- Stella, A. V., R. Paratte, L. Valnegri, G. Cigalino, G. Soncini, E. Chevaux, V. Dell'Orto, and G. Savoini. 2007. Effect of administration of live *Saccharomyces cerevisiae* on milk production, milk composition, blood metabolites, and faecal flora in early lactating dairy goats. Small Rumin. Res. 67: 7-13.
- Swartz, D. L., L. D. Muller, G. W. Rogers, and G. A. Varga. 1994. Effect of yeast cultures on performance of lactating dairy cows: a field study. J. Dairy Sci. 77: 3073-3080.
- Tarvydas, V., R. Mankevicius, and S. Bliznikas. 1993. Effects of viable yeast culture on milk production intake, nutrient digestibility, nitrogen availability and rumen fermentation of lactating cows (poster). in Alltech's 9th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Thomas, J. 1988. Effect of Yea-Sacc on milk volume, milk quality cow condition and silage intake. Alltech (internal communication).
- Wang, Z., M. L. Eastridge, and X. Qiu. 2001. Effects of forage neutral detergent fiber and yeast culture on performance of cows during early lactation. J. Dairy Sci. 84: 204-212.
- Weiss, W. 1991. Effect of Yea-sacc1026 on milk yield and composition at a german dairy (poster). in Alltech's 7th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Wiedmeier, R. D., M. J. Arambel, and J. L. Walters. 1987. Effect of yeast culture and *Aspergillus oryzae* fermentation extract on ruminal characteristics and nutrient digestibility. J. Dairy Sci. 70: 2063-2068.

- Williams, P. E., C. A. Tait, G. M. Innes, and C. J. Newbold. 1991. Effects of the inclusion of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* plus growth medium) in the diet of dairy cows on milk yield and forage degradation and fermentation patterns in the rumen of steers. *J. Anim. Sci.* 69: 3016-3026.44.
- Wohlt, J. E., A. D. Finkelstein, and C. H. Chung. 1991. Yeast culture to improve intake, nutrient digestibility, and performance by dairy cattle during early lactation. *J. Dairy Sci.* 74: 1395-1400.
- Yoon, I. K. and M. D. Stern. 1996. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* cultures on ruminal fermentation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 79: 411-417.
- Zinn, R. A., E. G. Alvarez, S. Rodriguez, and J. Salinas. 1999. Influence of yeast culture on health, performance and digestive function of feedlot steers. Pages 335-338 in *Annu. Meet. – West. Sect., Am. Soc. Anim. Sci.*

8. OBJECTIFS DE LA THESE

8.1. Apport de levures

De nombreuses études traitant de la supplémentation en levures chez les ruminants ont été réalisées chez les bovins ou les ovins, mais très peu l'ont été chez les caprins. De plus, l'influence de l'apport de levures dans l'alimentation des ruminants a souvent été étudiée sur les paramètres zootechniques (ingestion, production, croissance), les paramètres fermentaires ruminiaux, l'écosystème microbien ruminal ou la digestibilité des aliments, mais aucune étude montrant l'influence des levures sur le comportement alimentaire des animaux n'a été publiée.

Cette thèse avait pour objectif d'étudier l'intérêt de l'apport de levures vivantes (*Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech) chez des chèvres en lactation, recevant un régime riche en concentré. L'analyse de l'influence des levures a été réalisée non seulement sur des paramètres zootechniques et fermentaires, mais également sur des paramètres comportementaux, et plus particulièrement le comportement alimentaire et le budget-temps des animaux.

8.2. Acidose sub-clinique

L'acidose sub-clinique est un problème majeur des élevages intensifs de ruminants et des filières de production associées. Cependant, c'est un phénomène relativement difficile à diagnostiquer et à prévenir, de par le très grand nombre de facteurs impliqués. L'acidose sub-clinique a également été principalement étudiée d'un point de vue métabolique, physiologique ou ruminal, mais très peu d'études se sont intéressées à la relation entre acidose sub-clinique et comportement alimentaire ou rythme d'activité. Or, il semble que le comportement alimentaire individuel pourrait expliquer, au moins en partie, la très grande variabilité de susceptibilité des ruminants à l'acidose.

Cette thèse avait donc également pour objectif de déterminer l'influence du comportement alimentaire individuel sur la susceptibilité des animaux à l'acidose, mais également l'influence de l'acidose sur le comportement alimentaire individuel des animaux.

8.3. Problématique

Dans une filière confrontée au problème croissant de l'acidose et à la nécessité de trouver des compléments alimentaires pour améliorer les performances des animaux, cette thèse avait pour objectifs de relier des aspects de nutrition et de comportement, afin de mieux comprendre le phénomène d'acidose sub-clinique, le mode d'action des levures dans un rumen perturbé par l'acidose, et l'influence du comportement individuel sur la susceptibilité des animaux à l'acidose et leur réponse à une supplémentation en levures

Le premier chapitre a permis de définir les notions d'acidose et de comportement, de mettre en évidence la très forte relation existant entre ces deux paramètres, et de passer en revue les principaux facteurs pouvant influencer la susceptibilité des animaux à l'acidose. La bibliographie quantitative sur l'influence de l'apport de levures chez les ruminants a montré que, malgré une très forte variabilité, l'apport de levures a une influence positive sur la production des animaux, augmente le pH ruminal et stabilise les fermentations ruminales, mais que les résultats dépendent fortement des conditions expérimentales.

L'étude de l'acidose sub-clinique, et le suivi individuel de la réponse des animaux à un régime acidogène et à l'apport de levures ont nécessité de nombreuses mises au point méthodologiques (chapitre 2 et annexe 1). Ceci a permis d'obtenir un nombre conséquent de paramètres mesurés, et une fréquence de mesure élevée pour les principaux paramètres caractérisant l'acidose et le comportement alimentaire.

Ce suivi quotidien et individuel des animaux a permis de mettre en évidence une grande variabilité de réponse des animaux au régime acidogène (chapitre 3). En particulier, cela a permis de déterminer des épisodes ponctuels, mais intenses, de « crise » d'acidose et de modéliser l'évolution dynamique inter-jours des principaux paramètres mesurés. Cela a également permis de mettre en évidence une grande variabilité intra- et inter-jours du comportement alimentaire.

La prise en compte de ces crises ponctuelles d'acidose dans les analyses suivantes a permis de déterminer les conséquences de la supplémentation en levures et de l'acidose sur les paramètres zootechniques et physiologiques (chapitre 4), comportementaux (chapitre 5) et l'écosystème microbien ruminal (chapitre 6) en dissociant les effets des crises de ceux des levures.

L'ensemble des résultats obtenus est ensuite discuté dans le chapitre 7 par rapport aux connaissances actuelles avant de conclure.

CHAPITRE 2

Mises au point méthodologiques

CHAPITRE 2 : Mises au point méthodologiques

1. Effet du pourcentage de concentré sur le pH ruminal et le budget-temps de chèvres laitières

Effect of concentrate percentage

on ruminal pH and time-budget in dairy goats

2. Etude comparée du comportement alimentaire de chèvres laitières en cases individuelles mesuré par enregistrement vidéo ou grâce à un appareil électronique portatif

Comparison of video recording and a portable electronic device for measuring the feeding behaviour of individually housed dairy goats

1. Effet du pourcentage de concentré sur le pH ruminal et le budget-temps de chèvres laitières

L'acidose sub-clinique est un trouble nutritionnel rencontré dans de nombreux élevages intensifs de ruminants et qui résulte de l'ingestion de régimes riches en concentré. Elle est définie par des chutes de pH ruminal courtes et répétées. Si les conséquences métaboliques de l'augmentation du pourcentage de concentré dans les rations ont été relativement bien décrites dans la littérature, les conséquences comportementales ont été peu prises en compte.

Objectif

→ Etudier les adaptations comportementales des animaux à un régime riche en concentré en comparant ingestion, production, pH ruminal et budget-temps chez les mêmes animaux recevant deux régimes plus ou moins riches en concentré.

Matériels et méthodes

Huit chèvres en milieu de lactation, réparties en deux groupes, ont successivement reçu deux régimes plus ou moins riches en concentré (H : 60 ou L : 30 %) selon un dispositif en cross-over. Les deux périodes expérimentales ont duré quatre semaines et ont été séparées par une semaine de transition entre les deux régimes. La ration était distribuée deux fois par jour, dans les proportions d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi, conformément à l'intervalle de temps entre les traites.

Les quantités ingérées ont été mesurées quotidiennement et calculées en gramme de matière sèche par kilogramme de poids vif. La production laitière a été mesurée cinq jours par semaine, la composition du lait et le poids vif une fois par semaine. Le pH ruminal a été enregistré automatiquement toutes les minutes par une sonde de pH ruminale. Les chèvres ont été filmées par des caméras durant 24 h chaque week-end et le budget-temps a été analysé grâce au logiciel The Observer® (Noldus Technology, The Netherlands).

Résultats

Par rapport au régime L, la distribution du régime H a augmenté les quantités journalières ingérées et la production de lait, mais a diminué le taux butyreux du lait et inversé le rapport taux butyreux sur taux protéique. Par rapport au régime L, le régime H a augmenté le pourcentage de temps passé sous un pH seuil de 6,0, mais les deux régimes ont induit des périodes pendant lesquelles le pH était inférieur à 6,0.

Lorsqu'ils recevaient le régime H, par rapport au régime L, les animaux ont passé moins de temps à manger et à ruminer, plus de temps à se reposer et à boire, et semblent avoir mangé et ruminé plus souvent, mais pendant des périodes plus courtes. Les différences de comportement ont principalement été observées pendant les heures suivant les distributions, et peu de différences ont été observées pendant la nuit.

Discussion et conclusion

- L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration a permis d'augmenter les quantités ingérées et la production laitière, au détriment de la production de matière grasse.
- H a été plus acidogène que L, bien que les deux régimes aient induit, du moins ponctuellement, de l'acidose sub-clinique.
- Lorsqu'elles recevaient le régime riche en concentré, les chèvres ont adapté leur comportement alimentaire au régime distribué, ce qui a certainement limité les perturbations digestives liées à l'augmentation du pourcentage de concentré, et pourrait expliquer que le régime H n'a pas induit beaucoup plus d'acidose que le régime L.

Effect of concentrate percentage on ruminal pH and time-budget in dairy goats

M. Desnoyers, C. Duvaux-Ponter, K. Rigalma, S. Roussel, O. Martin and S. Giger-Reverdin

UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude Bernard 75005 Paris, France

Corresponding author: Marion Desnoyers. E-mail: marion.desnoyers@agroparistech.fr

Running head

Concentrate percentage, rumen pH and time-budget

Animal (sous presse)

Abstract

The aim of this study was to compare rumen pH and time-budget in eight mid-lactation goats receiving two diets in a cross-over design (L: 30 % and H: 60 % concentrate). Feeding H increased daily intake (4.3 ± 0.08 vs. 4.7 ± 0.08 % of body weight for L and H, respectively) and daily milk production (3.01 ± 0.130 vs. 3.50 ± 0.130 kg/d of 3.5 % fat corrected milk for L and H, respectively). It decreased milk fat and inverted the fat to protein ratio (1.07 ± 0.054 vs. 0.94 ± 0.054 for L and H, respectively). As suggested by the percentage of time spent with rumen pH below 6.0 (23.4 ± 6.60 % vs. 39.9 ± 5.88 % for L and H, respectively), H was more acidogenic than L. When offered H instead of L, goats spent less time eating (298 ± 17.5 vs. 265 ± 17.5 min for L and H, respectively) and ruminating (521 ± 21.0 vs. 421 ± 21.0 min for L and H, respectively) but more time resting (352 ± 27.1 vs. 459 ± 21.1 min for L and H, respectively) over a 24 h period. They also tended to spend more time drinking (20 ± 2.9 vs. 25 ± 2.9 min for L and H, respectively; $P = 0.08$) when offered H rather than L. These differences in activities were mainly observed during the first hours following feeding. When offered H, goats adapted their feeding behaviour around the feedings which allowed them to limit the physiological disturbances potentially inducible by H and to increase milk production, without experiencing too much acidosis.

Keywords: acidosis, dairy goat, animal behaviour, rumen pH

Introduction

A major negative consequence of feeding high concentrate diets to high producing ruminants is the occurrence of subacute ruminal acidosis. Acidosis is usually defined as a decrease in rumen pH below a threshold value of 6.0, but its severity is related to the frequency and duration of alterations in rumen pH. Acute acidosis is defined by long bouts of rumen pH below 5.0 and subacute acidosis by mean rumen pH below 6.0 and short bouts of rumen pH between 5.5 and 5.0 (Nocek, 1997, Oetzel, 2000). For Sauvant *et al.* (1999) a mean rumen pH of 6.25 corresponds to around 4 h spent below 6.0 and could thus be used as a threshold to define the occurrence of subacute acidosis. Subacute ruminal acidosis is one of the major concerns of current ruminant nutrition because it is poorly detected in herds and it has many consequences, such as decreased milk production, decreased efficiency of milk production, premature culling and increased mortality (Krause and Oetzel, 2005). Subacute acidosis is frequently studied from digestive or metabolic points of view (Braun *et al.*, 1992, Martin *et al.*, 2006, Peyraud and Apper-Bossard, 2006) but behavioural aspects are very seldom taken into account. On a daily basis, goats adapt their feeding behaviour depending on the composition of the diet offered, especially in terms of number of meals and meal layout during the day, as shown by Abijaoudé *et al.* (2000a, 2000b). Thus, goats might adapt their daily time-budget according to the percentage of concentrate in the diet.

The aim of this study was to determine adaptations in goat behaviour due to high concentrate diets, by comparing, in the same animals, feed intake, milk production, rumen pH and time-budget with two diets differing in their concentrate percentage.

Materials and methods

Diets, animals and experimental design

Eight fistulated dairy goats (Saanen and Alpine) in mid lactation (79 ± 5.6 days in milk), averaging 60 ± 4.9 kg body weight and producing 3.1 ± 0.60 kg milk per day at the start of the experiment were used. The experiment was conducted under the guidelines given by the French Agriculture Ministry. Animals were assigned to two groups, which were balanced according to goat parturition date, body weight, milk production the previous year and breed. They were housed in 2 m x 1 m individual pens throughout the experimental period, with free access to water.

Table 1 *Composition and analysis of two experimental diets containing either a low (L) or a high (H) percentage of concentrate*

diet	L	H
<i>Composition:</i>		
Concentrate (% DM) ^a	30.0 ^b	60.0 ^c
Grass hay (% DM)	46.6	26.6
Sugar beet pulp (% DM)	23.4	13.4
Dry Matter (%)	58	67
Net Energy MJ/kg DM	6.28	6.78
PDIN (g/kg DM)	100	136
PDIE (g/kg DM)	105	123
<i>Analysis (% DM)</i>		
NDF	48.2	37.9
ADF	24.0	16.7
ADL	2.4	1.3

^a20 % wheat, 20 % barley, 20 % oats, 35 % soyabean meal, 3 % mineral and vitamin premix and 2 % of molasses

^b composition of the mineral and vitamin premix (per kg of premix): 702 g (CaCO₃), 119 g dicalcium phosphate, 88 g (NaCl), 21.21 g (ZnSO₄, 7 H₂O), 1.04 g/kg (MnSO₄, H₂O), 0.02 g (CoSO₄), 0.05 g (KI), 0.02 g (Na₂SeO₃), 400 000 IU Vitamin A, 100 000 IU Vitamin D, 2 000 IU Vitamin E, 63.33 g corn starch

^c composition of the mineral and vitamin premix (per kg of premix): 702 g (CaCO₃), 88 g/kg (NaCl), 6.82 g (ZnSO₄, 7 H₂O), 1.04 g (MnSO₄, H₂O), 0.01 g (CoSO₄), 0.03 g (KI), 0.01 g (Na₂SeO₃), 200 000 IU Vitamin A, 50 000 IU Vitamin D, 1 000 IU Vitamin E, 199.72 g corn starch

Diet composition is described in Table 1. Energy and nitrogen values of the feed and the diet were calculated according to the additive method from the INRA tables (Baumont *et al.*, 2007). Goats were given two total mixed rations: high concentrate diet (H) containing 60 % concentrate and low concentrate diet (L) containing 30 % concentrate. Diets were offered in a cross-over design of two four week-periods separated by three days of transition diet. The concentrate part of the diets was composed of wheat (20 %), barley (20 %), oats (20 %), soyabean meal (35 %) and a vitamin and mineral mixture. Forage was a mixture of two thirds chopped grass hay and one third ensiled sugar beet pulp on a dry matter basis. Goats were fed *ad libitum* and quantities offered were adjusted weekly to ensure 10 % refusals. Feed was offered individually twice a day after milking, in the proportion of two thirds in the afternoon and one third in the morning, according to the time interval between milkings.

Experimental measurements

Experimental measurements were performed during all the weeks of the cross-over design. Animals were weighed weekly. Offered feed and refusals were individually weighed daily, which allowed the assessment of dry matter intake (**DMI**) using the theoretical dry matter percentage of the diet. Daily DMI per kg of body weight was calculated using the body weight of the previous week. Day to day variability in DMI (**cvDMI**) was assessed using the coefficient of variation calculated as the absolute value of the difference in DMI between two successive days divided by the mean value of these two days. Raw milk yield (**RMY**) was recorded daily and milk composition was analysed once a week on milk from two consecutive milkings. Fat corrected milk (35 g/kg basis) (**FCM**) was calculated according to the formula of Sauvant *et al.* (2007) and day to day variability in milk yield (**cvRMY**) was assessed using the coefficient of variation calculated as the absolute value of the difference in RMY between two successive days divided by the mean value of these two days. Energy and nitrogen balances were calculated according to the formula published by Sauvant *et al.* (2007).

Rumen pH was continuously monitored by indwelling pH probes. Goats were accustomed, for one week before the start of the experiment, to wear a coat covering their back and maintained by individually adjusted elastic straps. Rumen pH was measured every minute by a self cleaning pH probe (accuracy = 0.01 pH, Fisher Bioblock Scientific, France) placed in the rumen through the ruminal cannulae and linked to a portable device (Easy Log EL-2, Omega engineering inc) (Brossard *et al.*, 2003) placed in one of the coat pockets. A 300 g weight was attached to each probe to reduce its mobility in the rumen. Mean daily pH and percentage of time when the pH was below 6.0 were calculated.

Time-budget of the goats was analysed using four video cameras recording two goats at a time. They were fitted to the ceiling above the individual pens and linked to a quad splitter allowing cyclic sequences to be recorded with a time-lapse video recorder. Nycthemeral activity of the goats was recorded during the last two weekends of each period. Twenty-four hours, from the end of the afternoon milking to the start of the next afternoon milking were analysed during each of these weekends by scan sampling of five seconds every two minutes using The Observer software (version 5.0, 2004, Noldus Information Technology, Wageningen, The Netherlands). The calculated variables were: total time spent standing, lying, ruminating, eating and idling, latency for rumination after feeding and mean duration of bouts for all these behaviours. The variables were analysed throughout the day and by two hour intervals (12 intervals). Posture and activities were recorded independently.

Statistical analyses

Data were analysed using a repeated measures analysis of variance and statistical analyses were carried out by the mixed model procedure of SAS (version 9.1 2002), using the following model.

$$Y_{ijkl} = \alpha_i + \beta_t + \gamma_j + \delta_k + (\gamma\delta)_{jk} + e_{ijkl}$$

Where α_i is the random effect of the goat; β_t , γ_j , and δ_k are respectively the fixed effect of time (day or week number according to the parameter), diet (H or L) and experimental period, $(\gamma\delta)_{jk}$ is the interaction between diet and experimental period and e_{ijkl} is the residual error.

Milk production analysis used DMI as a covariable in the model.

Nycthemeral kinetics of rumen pH were analysed using a repeated measures analysis of variance using the following model.

$$Y_{ijk} = \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$$

Where α_i is the random effect of the time after feeding (4 minutes intervals), β_t is the fixed effect of the diet (H or L) and $(\alpha\beta)_{ij}$ is the interaction between diet and time after feeding.

When assumptions of homogeneity of variance and normal distribution of the residuals were not confirmed (cvDMI and cvRMY) a square root transformation was performed before carrying out the analysis. All data are presented as least square means (lsmean) \pm standard errors (SE) except when otherwise stated.

Table 2 Effect of feeding a low (L: 30%) or high (H: 60%) concentrate diet in a cross-over design on intake and production parameters

	Diet		SE ^a	P ^b
	L	H		
Dry Matter Intake (% of BW/day)	4.31	4.66	0.084	***
DMI variability (% of BW/day) ^c	0.46 (0.21)	0.55 (0.30)	0.022	***
Body Weight (kg)	62.5	61.9	0.48	NS
Raw milk yield (kg/day)	3.08	3.56	0.044	***
3.5% Fat Corrected Milk (kg/day)	3.01	3.50	0.130	***
RMV variability (kg/day) ^c	0.42 (0.18)	0.46 (0.21)	0.029	NS
Fat (%)	3.43	3.08	0.146	*
Protein (%)	3.20	3.29	0.033	NS
Fat/protein ratio	1.07	0.94	0.054	*
Energy intake (MJ/d) ^d	16.9	19.4	0.35	***
Energy balance (MJ/d) ^d	2.1	3.9	0.50	***
Nitrogen intake (g PDI/d) ^d	269	354	6.1	***
Nitrogen balance (g PDI/d) ^d	75	148	8.4	***

^a standard error of the difference of LSM.

^b †: $0.05 \leq P < 0.10$, NS: $P \geq 0.10$

^c square root transformed data with, backtransformed data in brackets

^d Calculated from the INRA Tables (Baumont *et al.*, 2007)

Results

One of the four goats which started with H suffered from an acute bout of acidosis during the first experimental period. Its milk production decreased abruptly and did not increase thereafter, even while receiving the L diet. This goat was removed from all the calculations.

Body weight, intake and milk production

Body weight, intake and milk production results are presented in Table 2. Body weight was not influenced by the diet. Increasing the percentage of concentrate in the diet increased DMI, RMY, FCM and cvDMI. cvRMY was not influenced by the concentrate percentage. Milk protein percentage was not influenced by the diet but fat percentage decreased when the percentage of concentrate increased in the diet. Fat to protein ratio was lower for H than for L and inverted between the two diets. Energy and nitrogen balances were positive for the two diets but were almost doubled for H compared to L.

Rumen pH and acidosis

Mean daily pH was lower for H than for L (6.09 ± 0.071 vs. 6.25 ± 0.072 , respectively; $P = 0.003$). The percentage of time when the pH was below 6.0 increased with the concentrate percentage (23.4 ± 6.60 % vs. 39.9 ± 5.88 % for L and H, respectively; $P = 0.002$).

Figure 1 represents the nycthemeral kinetics of rumen pH. The interaction between diet and time after feeding, when analysed by four minutes intervals, was not significant. This indicates that the pattern of averaged diurnal rumen pH was similar between treatments and the curve for H was below that of the curve for L by 0.23 pH units ($P < 0.001$).

Nycthemeral activity

Daily total durations and behavioural bout mean durations are presented in Table 3. Increasing the percentage of concentrate in the diet tended to decrease the total duration of intake and decreased mean duration of intake bouts. The total time spent drinking tended to increase with H compared to L. The total time spent idling was longer when goats received H than when they received L but the mean duration of idling bouts was not influenced by the diet. Increasing the percentage of concentrate in the diet decreased total time spent ruminating and mean duration of rumination bouts. The total time spent lying or standing and the mean duration of lying and standing bouts were not influenced by the diet.

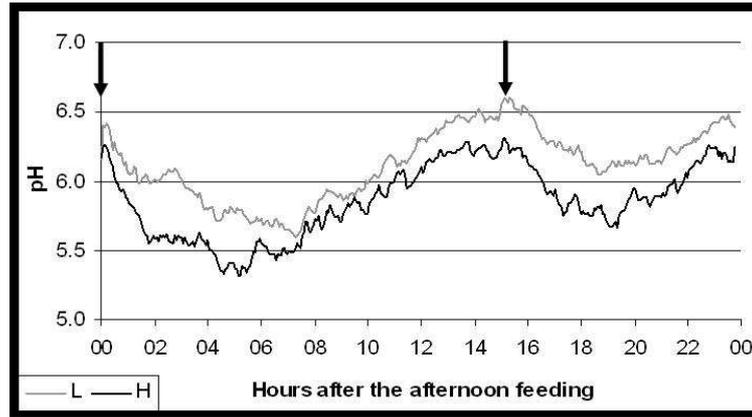


Figure 1 Nycthemeral kinetics of rumen pH in seven mid-lactation dairy goats offered a low (L: 30%) or high (H: 60%) concentrate diet (arrows represent feeding)

Table 3 Behavioural parameters over 24 hours in dairy goats offered a low (L: 30%) or high (H: 60%) concentrate diet

	Diet		SE ^a	P ^b
	L	H		
Total duration of postures (min/day)				
standing	536	532	33.7	NS
lying	828	844	36.3	NS
Total duration of activities (min/day)				
intake	298	265	17.5	†
rumination	521	421	21.0	***
idling	352	459	27.1	**
drinking	20	25	2.9	†
Mean duration of postures (min/bout)				
standing	20	24	2.4	NS
lying	26	18	5.8	NS
Mean duration of activities (min/bout)				
intake	13	10	1.3	*
rumination	18	13	1.3	*
idling	13	12	0.7	NS
Rumination latency (min) ^c				
afternoon feeding	110	71	13.0	*
morning feeding	80	77	9.3	NS

^a standard error of the difference of LSM.

^b †: $0.05 \leq P < 0.10$; NS: $P \geq 0.10$

^c Latency of the first rumination bout after feeding

Latency before the start of the first rumination bout was shorter when the animals were offered H than when they were offered L after the afternoon, but not after the morning feeding (Table 3).

The time spent eating and ruminating during each of the 12 intervals is presented in Figure 2. Goats spent less time eating with H than with L only during the two intervals including feeding (0730 h - 0930 h and 1530 h - 1730 h) and during the first interval after the afternoon feeding (1730 h - 1930 h). No differences were observed during the remaining intervals. When offered H, goats spent less time ruminating after the morning feeding (0930 h - 1330 h), during the evening (1930 h - 2330 h) and during the early morning (0530 h - 0730 h), but spent more time ruminating during the interval including the afternoon feeding (1530 h - 1730 h). No differences were observed during the remaining intervals.

The time spent drinking and idling during each of the 12 intervals is not presented as a figure. The time spent drinking was higher with H than with L during two intervals (1930 h - 2130 h; 166 ± 43.7 vs. 43 ± 44.3 seconds for H and L, respectively; $P = 0.04$) and 0130 h - 0330 h; 28 ± 7.7 vs. 0 ± 7.7 seconds for H and L, respectively; $P = 0.019$). No differences were found during all the other intervals.

The time spent idling tended to be increased by H compared to L during the first three intervals (0730 h - 1330 h) (7 ± 3.0 vs. 2 ± 3.1 min; $P = 0.097$; 37 ± 6.8 vs. 22 ± 7.0 min; $P = 0.076$ and 51 ± 7.6 vs. 39 ± 8.0 min, $P = 0.095$, for H and L, respectively), and was increased during the afternoon feeding and the following interval (1530 h - 1930 h) (15 ± 3.1 vs. 2 ± 3.1 min, $P = 0.01$ and 42 ± 7.5 vs. 20 ± 7.9 min, $P = 0.01$, for H and L, respectively). No differences were found during the remaining intervals.

Figure 3 shows for each interval the time spent standing and lying. During the interval including the afternoon feeding (1530 h - 1730 h) increasing the percentage of concentrate in the diet tended to decrease the time spent standing. During the next interval (1730 h - 1930 h) goats spent less time standing and more time lying when offered H than when offered L, while the opposite was observed for the next two intervals (1930 h - 2330 h). No differences were found during the other intervals.

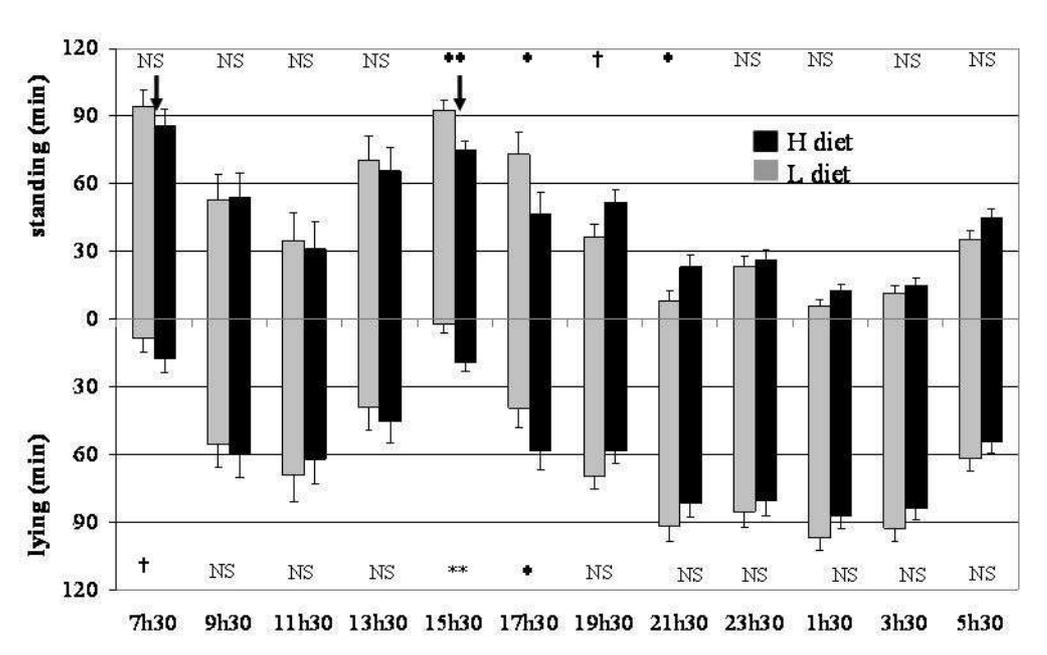


Figure 2 Nycthemeral kinetics of eating and ruminating in mid-lactation dairy goats offered a low (L: 30%) or high (H: 60%) concentrate diet. Interval starting times are indicated below. Arrows represent feeding. †: $0.05 \leq P < 0.10$; NS: $P \geq 0.10$

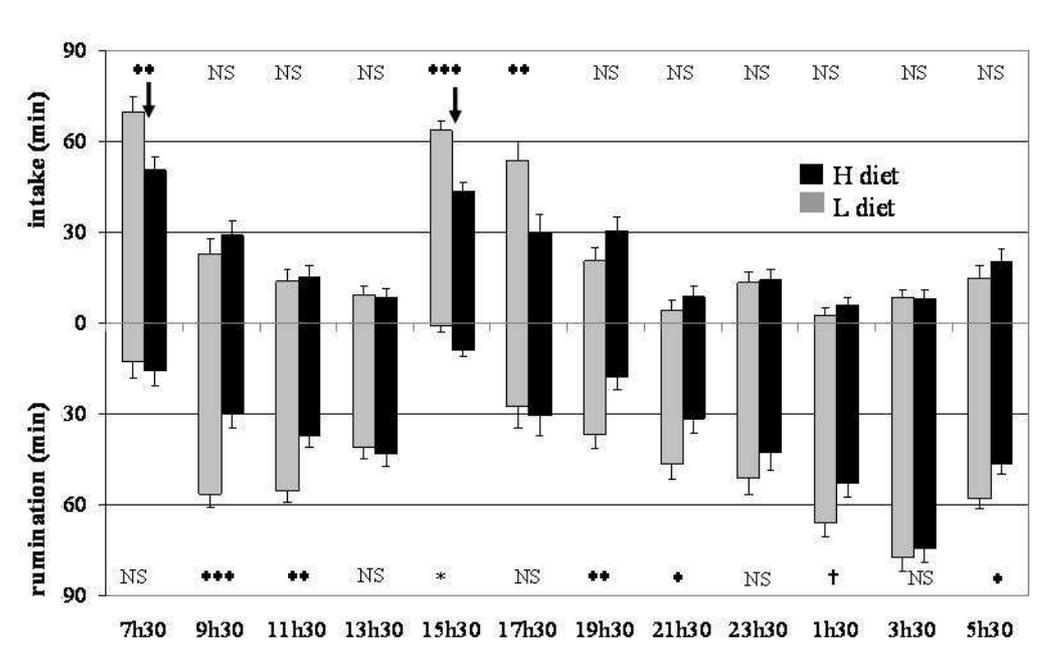


Figure 3 Nycthemeral kinetics of standing and lying in mid-lactation dairy goats offered a low (L: 30%) or high (H: 60%) concentrate diet. Interval starting times are indicated below. Arrows represent feeding. †: $0.05 \leq P < 0.10$; NS: $P \geq 0.10$

Discussion

Feeding a high concentrate diet increased DMI which agrees with the low rumen fill effect of concentrate compared to roughage (Jarrige *et al.*, 1995). Feeding a high concentrate diet also increased milk production, which agrees with other experiments performed in goats (Kawas *et al.*, 1991) and cows (Manson and Leaver, 1988). This is also in accordance with the higher nitrogen and energy content of the H diet and the two fold increases in nitrogen and energy balance in H compared to L. Changes in milk composition were in accordance with data from Kawas *et al.* (1991) in goats, Manson and Leaver (1988) in cows and Susin *et al.* (1995) in ewes although another experiment did not show any changes in milk composition or DMI when high concentrate diets based on barley silage were offered to dairy cows (Maekawa *et al.*, 2002).

Goats did not exhibit any clear symptoms of acidosis. Although the higher variability in day to day DMI observed with H could be a sign of subacute acidosis (Nocek, 1997, Owens *et al.*, 1998, Martin *et al.*, 2006), DMI was increased for H compared to L, which is not in accordance with the literature showing a decrease in DMI with acute acidosis (Owens *et al.*, 1998, Oetzel, 2000). The difference in the percentage of time spent with a pH below 6.0 between the two diets was similar to that observed by Keunen *et al.* (2002) after the induction of subacute acidosis in dairy cows which confirms that the animals fed H were suffering from subacute acidosis. However, the daily mean pH obtained with both diets in the present experiment are very close to the threshold of 6.25 proposed by Sauvant *et al.* (1999) to characterize subacute acidosis and they both induced at least four hours of rumen pH below 6.0. Thus, according to the definition of Sauvant *et al.* (1999) both diets induced some subacute acidosis but it is reasonable to suggest that H was more acidogenic than L. However, because the two diets not only differed in their acidogenic capacity but also their fibre, energy and protein content, it was difficult to determine the consequences of acidosis compared to those due to diet composition.

Regardless of the diet offered, the goats spent more time ruminating than eating which is in accordance with results obtained in lactating goats (Kawas *et al.*, 1991) and cows (Deswysen *et al.*, 1993, Maekawa *et al.*, 2002), but not with the results of Rapetti *et al.* (2005) and Abijaoudé *et al.* (2000b) in lactating goats. The total time spent eating and ruminating was shorter when the goats were offered H than L, which is in accordance with the literature on goats and cows (Kawas *et al.*, 1991, Abijaoudé *et al.*, 2000b, Maekawa *et al.*, 2002) and confirms that the total time spent chewing (intake and rumination) decreases when the

proportion of NDF decreases in the diet (Maekawa *et al.*, 2002). When a physiological parameter changes too much, homeostatic regulation mechanisms try to maintain it within physiological limits (Sauvant, 1992). Thus, the higher concentrate percentage of the H diet probably induced a faster and more intense fermentation in the rumen, which is known to induce satiety due to the increase in rumen lactic acid (Buéno, 1975), propionic acid (Allen, 2000), osmotic pressure (Rémond *et al.*, 1995) or volatile fatty acids (Forbes, 2007). The shorter total chewing time observed with H might have limited the total amount of saliva and buffers secreted (Sauvant *et al.*, 2006) which could have increased the risk of acidosis for the animals offered H. Both the increase in the fermentation processes and the decrease in buffers from chewing could explain the lower rumen pH observed with H compared to L, but the difference was however lower than expected. Goats tended to spend more time drinking when offered H than when offered L. This might be due to the increase in osmolarity of rumen content but also to the lower water content of the diet H compared to L. This result, however, has to be confirmed because scan sampling techniques are less precise for measuring behaviours of short duration, like drinking, than those of long duration, like feeding, standing or lying (Mitlöhner *et al.*, 2001) and because the differences in drinking time observed during our experiment are of the same magnitude (2 min) as the scan sampling interval.

The mean durations of behavioural bouts (except standing) were shorter when the goats were offered H than when they were offered L, even if it was not always significant. No data were found for comparison in the literature. The shorter mean durations observed for intake and rumination bouts might be related to the shorter total intake and rumination duration observed during 24 hours. Shorter intake bouts might have resulted from earlier satiety with H than with L as already discussed. With high concentrate diets, the more relevant factor inducing satiety is the production of volatile fatty acids by ruminal fermentation, whereas in more fibrous diets, the main factor inducing satiety is the physical repletion of the rumen (see review by Forbes, 2007). The major satiety factor was probably VFA production for both L and H diets, but their production was probably faster and higher with H than with L, inducing earlier satiety signals and shorter mean durations of intake bouts. These shorter mean intake bouts allowed the daily repartition of chewing activities to increase during the day, which may have limited metabolic disorders, such as a decrease in pH. In turn, this might explain the small difference in rumen pH observed between the two diets. This increased daily repartition of intake has already been observed with a high concentrate diet (Abijaoudé *et al.*, 2000b). These shorter activity bouts may also highlight a greater activity level of the goats offered H. Some goats were actually very nervous, searching for straw, salt or something else to eat,

particularly during milking when they were outside their individual pens. Sawyer (1998) showed that excessive activity might be a sign of discomfort or pain, but more observations are needed to confirm that high concentrate diets or subacute acidosis can cause discomfort or pain.

The majority of rumination occurred during the night and the morning which is in accordance with the review by Beauchemin *et al.* (1990). However, regardless of the diet offered, the goats spent at least a little time ruminating during all the intervals, which could also have minimized fluctuations in rumen pH (Beauchemin *et al.*, 1990). The decrease in the total time spent ruminating when goats received H was due to decreased rumination time during the morning and the evening but not during the main night rumination period. The nycthemeral pattern of rumination was thus not really influenced by the diet. Goats offered H tended to spend more time resting during the morning while goats offered L spent more time ruminating, but the differences in resting time were of a lower magnitude than those for rumination.

During the early morning (0530 h – 0730 h) intake increased for both diets compared to the night intervals even without any feeding occurring, which agrees with data from Dulphy and Faverdin (1987). The majority of intake occurred during the day (0530 h to 2130 h) with two intake peaks after milking and feeding (0800 h and 1600 h), as has already been described (Beauchemin *et al.*, 1990, DeVries *et al.*, 2003). During the two intervals including feeding and during the first interval following the afternoon feeding, goats spent less time eating with H than with L. As it has already been discussed, this might be due to earlier satiety and thus a more rapid end to the meal due to higher fermentation rates with H than with L. These shorter main meals are in accordance with previous observations with high concentrate diets (Abijaoudé *et al.*, 2000a).

The time spent idling can be interpreted as resting periods, even if it was recorded during both standing and lying, because secondary behaviours (self grooming, interaction with the environment, observation of the environment, etc.) were recorded separately and therefore were not included in this idling time. Idling was longer when goats received H than when they received L during the intervals following feeding, which is in accordance with previous observations on intake and rumination. It also shows that there is a period without any activity between the end of a meal and the start of rumination which agrees with results from Dulphy and Faverdin (1987). This idling bout seemed to be longer with H than with L but as for meal determination we only assessed idling bouts and could not cluster them into a longer resting bout separating the end of the meal from the start of the first rumination bout.

Therefore, nycthemeral pattern was mainly influenced by the diet during the hours following feedings. When offered H, goats adapted their feeding behaviour, according to metabolic signals, which probably led to limited ruminal disturbances and which might explain why mean daily rumen pH of goats offered H remained above 6.0.

The time spent standing and lying was only influenced by the diet after the afternoon feeding (1730 h - 2330 h). As it has already been suggested, it is certainly due to the two intake periods, separated by resting and ruminating, observed with H, while goats receiving L performed a longer main meal, followed by resting and rumination.

High individual variability was observed during this experiment and seems to be typical of experiments dealing with subacute acidosis. For example, goat susceptibility to acidosis is highly variable: some goats probably did not suffer from subacute acidosis with the H diet while others certainly did. Thus, to progress further in the analysis, results have to be interpreted individually, according to the detection of acidosis bouts and not only according to the percentage of concentrate in the diet.

Conclusion

Increasing the percentage of concentrate in the diet from 30 % to 60 % increased DMI and milk production and decreased milk fat content. Both diets led to short periods of time where rumen pH was below 6.0 but H induced lower mean rumen pH and was therefore more acidogenic than L. We can conclude from this experiment that goats fed a high concentrate diet changed their nycthemeral activity patterns, particularly during the hours following feeding. They appeared to eat and ruminate more often but during shorter periods of time, which is probably due to satiety control. This adaptation could have limited the digestive disorders due to the rapid intake of a large amount of highly fermentable carbohydrates with the H diet. This adaptation might explain the small differences observed in rumen pH with the two diets.

Acknowledgments

We would like to thank J. Tessier, A. Aymard, M. Langot, G. Durandet, A. Severin and J. Kloster from the experimental farm at Grignon for the care of the goats and their technical assistance during the experiment. We thank C. Martin, L. Brossard and M. Fabre for their help in using pH probes. We also thank D. Sauvart, P. Morand-Fehr and A. Ponter for their advice and rereading the manuscript.

References

- Abijaoudé JA, Morand-Fehr P, Tessier J, Schmidely P and Sauvant D 2000a. Diet effect on the daily feeding behaviour, frequency and characteristics of meals in dairy goats. *Livestock Production Science* 64, 29-37.
- Abijaoudé JA, Morand-Fehr P, Tessier J, Schmidely P and Sauvant D 2000b. Influence of forage : concentrate ratio and type of starch in the diet on feeding behaviour, dietary preferences, digestion, metabolism and performance of dairy goats in mid lactation. *Animal Science* 71, 359-368.
- Allen MS 2000. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 83, 1598-1624.
- Baumont R, Dulphy JP, Sauvant D, Tran G, Meschy F, Aufrère J, Peyraud JL and Champciaux P 2007. Les tables de la valeur des aliments. In *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux-Valeurs des aliments. Tables INRA 2007*, pp. 181-286.
- Beauchemin KA, Kachanosky RG, Schaalje GB and Buchanan-Smith JG 1990. Characterizing rumination patterns of dairy cows using spectral analysis. *Journal of Animal Science* 68, 3163-3170.
- Braun U, Rihs T and Schefer U 1992. Ruminal lactic acidosis in sheep and goats. *Veterinary Record* 130, 343-349.
- Brossard L, Fabre M, Martin C and Michalet-Doreau B. 2003. Validation of continuous ruminal pH measurements by indwelling probes (poster). In *Conference of Gastrointestinal Function.*, Chicago, p. 25.
- Buéo L 1975. Rôle de l'acide DL-lactique dans le contrôle de l'ingestion alimentaire chez le mouton. *Annales de Recherches Vétérinaires* 6, 325-335.
- Deswysen AG, Dutilleul P, Godfrin JP and Ellis WC 1993. Nycterohemeral eating and ruminating patterns in heifers fed grass or corn-silage - Analysis by finite Fourier-transform. *Journal of Animal Science* 71, 2739-2747.
- DeVries TJ, von Keyserlingk MAG and Beauchemin KA 2003. Short communication: Diurnal feeding pattern of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 86, 4079-4082.
- Dulphy JP and Faverdin P 1987. L'ingestion alimentaire chez les ruminants : modalités et phénomènes associés. *Reproduction, Nutrition, Development* 27, 129-155.

- Forbes JM 2007. A personal view of how ruminant animals control their intake and choice of food: minimal total discomfort. *Nutrition Research Reviews* 20, 132-146.
- Jarrige R, Dulphy JP, Faverdin P, Baumont R and Demarquilly C 1995. Activités d'ingestion et de rumination. In *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*. In (ed. M Journet), pp. 123-181, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris, France.
- Kawas JR, Lopes J, Danelon DL and Lu CD 1991. Influence of forage-to-concentrate ratio on intake, digestibility, chewing and milk production of dairy goats. *Small Ruminant Research* 4, 11-18.
- Keunen JE, Plaizier JC, Kyriazakis L, Duffield TF, Widowski TM, Lindinger MI and McBride BW 2002. Effects of a subacute ruminal acidosis model on the diet selection of dairy cows. *Journal of Dairy Science* 85, 3304-3313.
- Krause KM and Oetzel GR 2005. Inducing subacute ruminal acidosis in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 88, 3633-3639.
- Maekawa M, Beauchemin KA and Christensen DA 2002. Effect of concentrate level and feeding management on chewing activities, saliva production, and ruminal pH of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 85, 1165-1175.
- Manson FJ and Leaver JD 1988. The influence of concentrate amount on locomotion and clinical lameness in dairy cattle. *Animal Production* 47, 185-190.
- Martin C, Brossard L and Doreau M 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *Productions Animales* 19, 93-108.
- Mitlöhner FM, Morrow-Tesch JL, Wilson SC, Dailey JW and McGlone JJ 2001. Behavioral sampling techniques for feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 79, 1189-1193.
- Nocek JE 1997. Bovine acidosis: implications on laminitis. *Journal of Dairy Science* 80, 1005-1028.
- Oetzel GR 2000. Clinical aspects of ruminal acidosis in dairy cattle. In 33rd Annual Conference, American Association of Bovine Practitioners, Rapid City, South Dakota, Usa, p. 14 pages.
- Owens FN, Secrist DS, Hill WJ and Gill DR 1998. Acidosis in cattle: A review. *Journal of Animal Science* 76, 275-286.
- Peyraud JL and Apper-Bossard E 2006. L'acidose latente chez la vache laitière. *Productions Animales* 19, 79-92.

- Rapetti L, Bava L, Tamburini A and Crovetto GM 2005. Feeding behaviour, digestibility, energy balance and productive performance of lactating goats fed forage-based and forage-free diets. *Italian Journal of Animal Science* 4, 71-83.
- Rémond B, Brugère H, Poncet C and Baumont R 1995. Le contenu du réticulo-rumen. In *Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion* (ed. YR R Jarrige, C Demarquilly, MH Farce and M Journet), pp. 253-298, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris, France.
- Sauvant D 1992. Systemic modeling in nutrition. *Reproduction, Nutrition, Development* 32, 217-230.
- Sauvant D, Meschy F and Mertens D 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *Productions Animales* 12, 49-60.
- Sauvant D, Giger-Reverdin S and Meschy F 2006. Le contrôle de l'acidose ruminale latente. *Productions Animales* 19, 69-78.
- Sauvant D, Giger-Reverdin S and Meschy F 2007. Alimentation des caprins. In *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux - Valeurs des aliments. Tables INRA 2007*, pp. 137-148.
- Sawyer DC 1998. Pain control in small-animal patients. *Applied Animal Behaviour Science* 59, 135-146.
- Susin I, Loerch SC and McClure KE 1995. Effects of feeding a high-grain diet at a restricted intake on lactation performance and rebreeding of ewes. *Journal of Animal Science* 73, 3199-3205.

2. Etude comparée du comportement alimentaire de chèvres laitières en cases individuelles mesuré par enregistrement vidéo ou grâce à un appareil électronique portable

Le comportement alimentaire des ruminants peut influencer les fermentations ruminales, en particulier en modifiant la quantité de salive apportée. Il est donc important de pouvoir le mesurer précisément. Des méthodes nombreuses et variées, généralement basées sur la détection des mouvements de tête (au pâturage) et/ou de mâchoire, ou plus récemment, sur la détection des sons issus de la mastication, ont été décrites dans la littérature.

Objectifs

→ Comparer deux méthodes de mesures du comportement alimentaire : les enregistrements vidéo et les mesures obtenues grâce à un Appareil Portable pour l'Etude du Comportement (APEC).

→ Déterminer les avantages et inconvénients de chaque méthode, selon les conditions expérimentales.

Matériels et méthodes

Douze chèvres en milieu de lactation ont reçu un régime riche en concentré (50 %) pendant 11 semaines. La ration était distribuée deux fois par jour, dans les proportions d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi, conformément à l'intervalle de temps entre les traites.

Les chèvres ont été filmées par des caméras durant 24 h chaque week-end et le budget-temps a été analysé grâce au logiciel The Observer® (Noldus Technology, The Netherlands) (cf. Ethogramme en annexe 2). L'activité masticatoire a été enregistrée par les APECs grâce à la détection des mouvements masticatoire à l'aide d'un tuyau capteur placé sous la mâchoire inférieure de l'animal et maintenu par un licol. Un logiciel spécifique a permis de distinguer les différentes activités masticatoires : ingestion, rumination ou repos masticatoire.

La comparaison entre les deux méthodes a été réalisée par corrélations sur 32 jours de mesures ou 779 intervalles d'1h.

Résultats

Les résultats obtenus avec les deux méthodes sont mieux corrélés lorsqu'ils sont analysés par intervalles d'une heure que sur le nyctémère.

La durée de rumination semble mieux estimée par les APECs que par les vidéos, car il est parfois difficile de déterminer sur les vidéos si l'animal est en train de ruminer ou de se reposer, particulièrement lorsqu'il est couché dans une partie sombre de sa case.

La durée d'ingestion semble mieux estimée par les vidéos que par les APECs, car les APECs interprètent les activités orales non alimentaires comme de l'ingestion, ce qui surestime la durée totale d'ingestion.

Discussion et conclusion

- Les deux méthodes se sont révélées intéressantes pour étudier le comportement alimentaire de chèvres en cases individuelles recevant une ration complète en deux distributions.

- Bien que les APECs incluent les activités orales non alimentaires dans l'ingestion, ces activités sont associées à une production de salive importante et leur durée est donc représentative de la quantité de salive produite par la mastication. Il est donc intéressant de les prendre en compte si les données de comportement doivent être analysées en rapport avec les fermentations ruminales. De plus, les animaux en groupe ou sur paille, ayant la possibilité de grignoter de la paille de litière ou d'interagir avec leurs congénères, réalisent certainement peu d'activités orales non alimentaires, par rapport à des animaux en cases individuelles.

- Les APECs permettent l'enregistrement en continu du comportement alimentaire indépendamment de la position de l'animal dans l'enclos, dans le groupe, ou au pâturage. Les animaux peuvent, néanmoins, détériorer le matériel, en particulier s'ils sont en groupes et lorsqu'il s'agit de chèvres.

- Les vidéos ne peuvent pas être endommagées par les animaux, mais il peut être difficile de déterminer l'activité de l'animal lorsque ce dernier est couché dans une partie sombre de sa case, ou lorsqu'il n'est pas face à la caméra. De plus, ce dispositif est difficilement utilisable en dehors d'un bâtiment.

- Le choix de la méthode dépendra des contraintes pratiques du système expérimental et des objectifs de l'expérimentation.

Comparison of video recording and a portable electronic device for measuring the feeding behaviour of individually housed dairy goats

M. Desnoyers*¹, G. Béchet², C. Duvaux-Ponter¹, P. Morand-Fehr¹ and S. Giger-Reverdin¹

¹ *UMR INRA AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 16 rue Claude Bernard 75005 Paris, France*

² *INRA URH-RAPA Theix 63122 Saint-Genès-Champanelle, France*

*Corresponding author: tel. +33 1 30 81 52 12 fax. +33 1 30 81 52 17

E-mail address: marion.desnoyers@agroparistech.fr

Soumis à Small Ruminant Research

Abstract

A detailed knowledge of chewing behaviour is important in understanding the factors that can affect digestive function in high producing ruminants. The aim of this study was to compare chewing behaviour either measured with a portable automatic system (APEC) which records jaw movements or obtained by scan sampling video analysis in 12 individually housed dairy goats. One hour and daily intervals were used for the analysis. APEC and video showed better agreement for one hour rather than for daily intervals but a very high individual variability was observed for all the parameters measured. Daily duration of rumination seemed to be assessed better by the APEC than by the video because it is sometimes difficult to determine if the goats are resting or ruminating on the video. Daily duration of intake was, however assessed better by the video because the automatic recorder interpreted all oral behaviours as intake, which is however accurate in order to assess total chewing time and the amount of saliva produced. The APEC allows continuous recording of activity independently of the animal's position in the pen or in a group or at pasture where animals cannot be filmed, however the device can be easily damaged by the animals. Video cannot be damaged by the animals but it can be difficult to determine the animal's activity if the animal is lying or not facing the camera, or in a dark part of its pen. Both systems were relevant to measure chewing behaviour of stall housed dairy goats, and to study the daily repartition of feeding behaviour but results have to be interpreted carefully.

Keywords: feeding behaviour; methodology; goat; video recording; automatic recording

Introduction

A detailed knowledge of feeding behaviour is important in understanding the factors that can affect digestive function in ruminants. Very frequent measurements are necessary to obtain reliable information on feeding behaviour but visual observations are very laborious. Penning (1983) reviewed the automatic techniques used to record grazing behaviour and described three main types: measurement of head movements by vibrarecorders, measurements of head movements by mercury tilt switches and measurement of jaw movements. The first two methods only allow assessment of grazing time while the third one allows assessment of eating, ruminating and idling times and can be used on stall housed animals. Many devices, using jaw movements as an indication of chewing, have been proposed. Chambers et al. (1981) proposed the simultaneous utilisation of jaw and head movements. Ruckebusch and Buéno (1973) and Béchet et al. (1978, 1995) used a pneumatic system based on the measurement of air pulses generated by the compression of a pipe by the lower jaw. Abijaoudé et al. (1999) modified this system to detect air vibrations instead of air pressure. Luginbuhl et al. (1987) used two contact points in a rubber tube which sent an electronic signal every time the tubing was elongated. Dado and Allen (1993) used a water filled tube and transformed pressure modifications into an analog signal. Other teams used electrical signals generated by carbon granules (Penning, 1983, Brun et al., 1984, Matsui, 1994, Rutter et al., 1997), strain gauges (Beauchemin et al., 1989), PVC gauge (Duranton and Bueno, 1982) or magnetic contact (Girard and Labonte, 1993). Some of these devices are carried by the animals which allows their use with free ranging animals (Béchet, 1978, Rutter et al., 1997, Abijaoudé et al., 1999) but data have to be downloaded frequently, except for the devices used by Chambers et al. (1981) and Matsui (1994) which could store data up to 10 or 22 days worth of data. Other systems (Law and Sudweeks, 1975, Duranton and Bueno, 1982, Beauchemin et al., 1989, Dado and Allen, 1993) need a connection between the animal and the converter, which makes them only suitable for stall housed animals. Most of the systems described were used with sheep or cattle and only a few were tested on goats (Matsui, 1994, Abijaoudé et al., 1999). Acoustic methods have recently been proposed (Galli et al., 2006, Ungar and Rutter, 2006). Jaw movements are recorded by a microphone and the sounds obtained are classified between “bite”, “chew” and “chew-bite” (Ungar and Rutter, 2006).

Recent developments in video data acquisition allow continuous recording of animal time budget and could provide an alternative system to analyse stall housed animal feeding behaviour. The aim of this study was firstly, to compare the use of video and an electronic

device adapted from one already described (Brun et al., 1984, Abijaoudé et al., 1999) for stall housed dairy goats and secondly, to determine the advantages and disadvantages of both systems depending on the aim of the experiment and the experimental design.

1. Materials and methods

1.1. Diets, animals and experimental design

Twelve cannulated dairy goats (eight Alpine and four Saanen) in mid lactation (52 ± 4.0 days after parturition at the start of the experiment), averaging 62 ± 6.8 kg of body weight and producing 3.5 ± 0.51 kg milk per day at the start of the experiment were used. The experiment was conducted under the guidelines given by the French Agriculture Ministry and lasted 11 weeks. They were housed in 2 m x 1 m individual pens throughout the experimental period, with free access to water. Feed was offered *ad libitum* and was given individually twice a day after milking, in the proportion of two thirds of the total at 16 h and one third at 8 h. Feed was offered as a total mixed ration with 35 % grass hay, 15 % ensiled sugarbeet pulp and 50 % of a concentrate mixture (25 % wheat, 25 % barley, 30 % maize, 15 % soyabean meal, 2% of molasses and 3 % of a vitamin and mineral premix) on a dry matter basis. Its NDF content was of 35.6 % on a dry matter basis.

1.2. Data recording

Chewing was recorded using the system developed at the INRA Theix (France) on sheep (Béchet et al., 1995), and already adapted for use in goats by Abijaoudé et al. (1999). The APEC (Appareil Portatif pour l'Etude du Comportement) consists of a light (350 g), small (15.5 cm x 9 cm x 4.5 cm) rectangular box powered by four batteries. Technical modifications have been made since the experiments of Abijaoudé et al. (1999), particularly to allow continuous recording over a long period of time without any damage to the apparatus or injury to the animals (Fig. 1). A leather halter especially made for goats was individually adjusted for each animal and fitted with foam on the parts which might injure them (head and nose). Instead of using a U-shaped plastic base fastened by means of a harness to the back of the goats (Abijaoudé et al., 1999), coats were designed, covering the back of the goats and maintained by elastic straps. They could be worn continuously by the goats over a few weeks or even months without causing injury. The coats contained two pockets to place experimental devices, such as the APEC or any other small automatic recorder. Starting one week before the beginning of the experiment each goat was accustomed to wearing their coat

and leather halter. Jaw movements were detected according to the method described by Abijaoudé et al. (1999) using a 10 cm flexible silicon pipe (8 mm internal and 12 mm external diameter) fixed on the halter, under the lower jaw of the goat. The signal was transmitted by another silicon pipe (4 mm internal and 7 mm external diameter) to the portable device placed in one of the coat pockets. In contrast to the experiment of Abijaoudé et al. (1999) in which the pipe was not protected, in the present experiment the transmission pipe was maintained along the animal's neck by a plastic collar, protected by a less flexible silicon pipe (8 mm internal and 11 mm external diameter) and was linked to the recording device through a small hole in the coat to prevent the goats biting it. A wire mesh was also fitted above the pen walls so that the goats could not bite the coat, device or silicon pipe of its neighbours. When the jaw moved, the compression of the pipe generated air vibrations that were transformed into electrical signals by a microphone and stored until downloaded. The device recorded every 2.5 seconds the occurrence or the absence of a jaw movement, and stored the number of 2.5 second intervals with or without chewing.

The APEC was connected by a cable (RS232) to a laptop equipped with a specific software programme written by Brun et al. (1984). Two electroluminescent diodes allowed the operator to check if the APEC was detecting and recording air vibrations. Recording could be started and stopped using a small magnet in front of the appropriate magnetic-sensitive switch. This ensured that it was not possible for the goat to switch the device off. Even if the device could store data for up to five days, data were downloaded daily during the afternoon milking to a computer via the RS232 cable. The data files obtained were then analysed by an additional software package which classified chewing activity bouts as rumination or intake. An intake or rumination period was a period exceeding seven minutes, and during which the animal maintained the same activity eventually including short pauses of less than seven minutes. Two types of intake were defined: nibbling or intensive intake, depending on whether the pauses accounted for more or less than 50 % of the duration of intake. Only the net durations of intake or rumination, when pauses were excluded, were used for the comparison. This software was modified by Reverdin (2004, unpublished) in order to allow automatic analysis of more data files, to save them in a format easily read by Excel, and to allow the calculation of the duration of net intake, net rumination or net idling over a specific time interval chosen by the experimenter between two and 60 minutes.

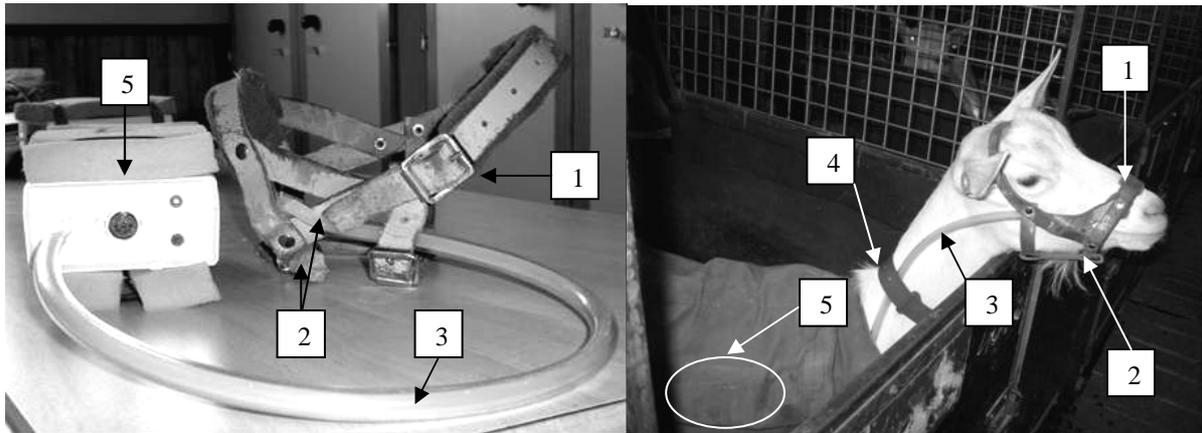


Fig. 1. Description of the portable electronic device (APEC) used to detect jaw movements. 1: halter especially adapted for goats, 2: flexible silicone pipe to detect jaw movements, 3: two flexible pipes, one for signal transmission and the other to protect the first one from being bitten by the goat, 4: plastic collar maintaining the tubing along the animal's neck, 5: portable electronic device to store data and placed in one of the coat pockets. The silicon pipe transmitting the signal is passed under the coat, to avoid the goats biting it, and then linked to the APEC through a small hole in the coat.



Fig. 2. Picture from a camera fixed to the ceiling and filming simultaneously two goats.

The daily time-budget of the goats was analysed using six video cameras (one per two goats) fitted to the ceiling above the individual pens, so that the two pens including feed troughs were visible (Fig. 2). The six video cameras were linked to a quad splitter allowing cyclic sequences and to a time-lapse video recorder (Panasonic AG-6730). This allowed alternate recording for each camera over 20 seconds and to record the daily time budget for the 12 goats during 24 hours on a single video-tape. Six lights (40 W) (one per two pens) were fitted above the individual pens to allow observation during the night. Their height was adjusted so that both pens could be seen, and so that shadows from the wire mesh were limited. Goats were accustomed to this light scheme during two weeks preceding the start of the recording period. Nycthemeral activity of the goats was recorded over 24 hours each weekend, when the goats were the least disturbed by activities in the goat facility, and was analysed by scan sampling of five seconds every two minutes using The Observer[®] (version 5.0, 2004, Noldus Technology, The Netherlands).

1.3. Data analysis

Only the days during which chewing behaviour was assessed simultaneously with the two systems were used for the analysis. The calculated variables for video analyses were: time spent eating, ruminating, performing any oral activity excluding rumination (intake, self-grooming, interactions with the environment or experimental devices and licking the salt block) and total time spent chewing (sum of all oral behaviours including eating and rumination). The two types of intake (net intensive intake and net nibbling) calculated by the APEC were merged as “net intake” for the analyses. Net durations of eating, ruminating and chewing (net intake + net rumination) were used for the analyses. Incomplete or damaged APEC files due to pipe rupture, harness loss or abnormal functioning of the device were discarded from all the calculations. Data from video and APEC were assessed using one-hour or one-day intervals for comparison. One-day intervals resulted from summing the one-hour intervals and their duration ranged from 20 to 23 hours because the one-hour interval containing the morning milking was not included in the analyses.

Some goats were also filmed during three weekends without an APEC and without a coat to determine if APEC or coats influenced chewing behaviour. The three weekends were compared to the closest recorded weekends with the APEC. These recording sessions were grouped in two periods: one at the beginning of the experiment and one at the end.

Table 1

Mean daily intake (DMI) and daily durations of intake, rumination and chewing according to the method used (portable electronic device: APEC or video) in 12 dairy goats in mid-lactation fed a high concentrate diet (means \pm SD).

	APEC	Video
DMI (kg/day)	2.414	± 0.448
DMI (g/kg BW)	39.6	± 7.56
Activities (min/day)		
Net eating	397 \pm 88	265 \pm 58
Net rumination	376 \pm 93	312 \pm 77
Net chewing	773 \pm 150	577 \pm 105
Non ingestive oral behaviour		118 \pm 56

Table 2

Correlation coefficients between the portable electronic device (APEC: A) and video (V) recordings for eating, ruminating and chewing activities analysed by one-day or one-hour intervals.

	Eating_A	Eating_A	Ruminating_A	Chewing_A
	Eating_V	Oral behav_V	Ruminating_V	Chewing_V
Days	0.45 (*)	0.61(***)	0.24 (NS)	0.59 (***)
Hours	0.86 (***)	0.89 (***)	0.69 (***)	0.73 (***)

NS $P > 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

The influence of the experimental devices was analysed using the mixed model procedure of SAS (version 9.1 2002) according to the following model:

$$Y_{ijkln} = \alpha_n + \beta_i + \gamma_j + \delta_k + \zeta_l + e_{ijkln}$$

Where α_n is the random effect of the goat; β_i , γ_j , δ_k and ζ_l are respectively the fixed effect of the APEC, coat, period and interval (only when data were analysed by one-hour intervals) and e_{ijkln} is the residual error.

Comparisons between the two methods were performed with 779 one-hour intervals and 32 one-day intervals, using the REG procedure of SAS (version 9.1 2002). All the goats were not equally represented in the data set because some of them tended to damage the silicon pipes which limited the amount of data which could be recorded with the APEC system. Linear regressions were calculated using: “net chewing APEC and chewing video”, “net intake APEC and intake video”, “net intake APEC and oral behaviour video” and “net rumination APEC and rumination video”.

2. Results

Goat behaviour (durations of intake, rumination or other oral behaviours) was not affected by the presence or absence of an APEC or a coat ($P > 0.10$ for all behaviours). Daily DMI, expressed in kg or g/kg of body weight, was also unaffected by the presence of the experimental apparatus.

Table 1 shows the mean daily dry matter intake (DMI) and the mean daily durations, of intake, rumination, chewing and non ingestive oral behaviours measured by each method during the days used for the comparison. For all the behaviours, APEC values were numerically higher than those of the video. The correlations between visual observations and APEC measurements (Table 2) ranged from 0.24 for rumination to 0.61 for oral behaviours for daily intervals and from 0.69 for rumination to 0.89 for oral behaviours for hourly intervals.

Fig. 3a and b show, for one-day and one-hour intervals respectively, the linear regression between the total duration of chewing measured either with the APEC or with the video. For both interval types, the total duration of chewing showed better agreement between APEC and video for the long rather than the short durations of chewing.

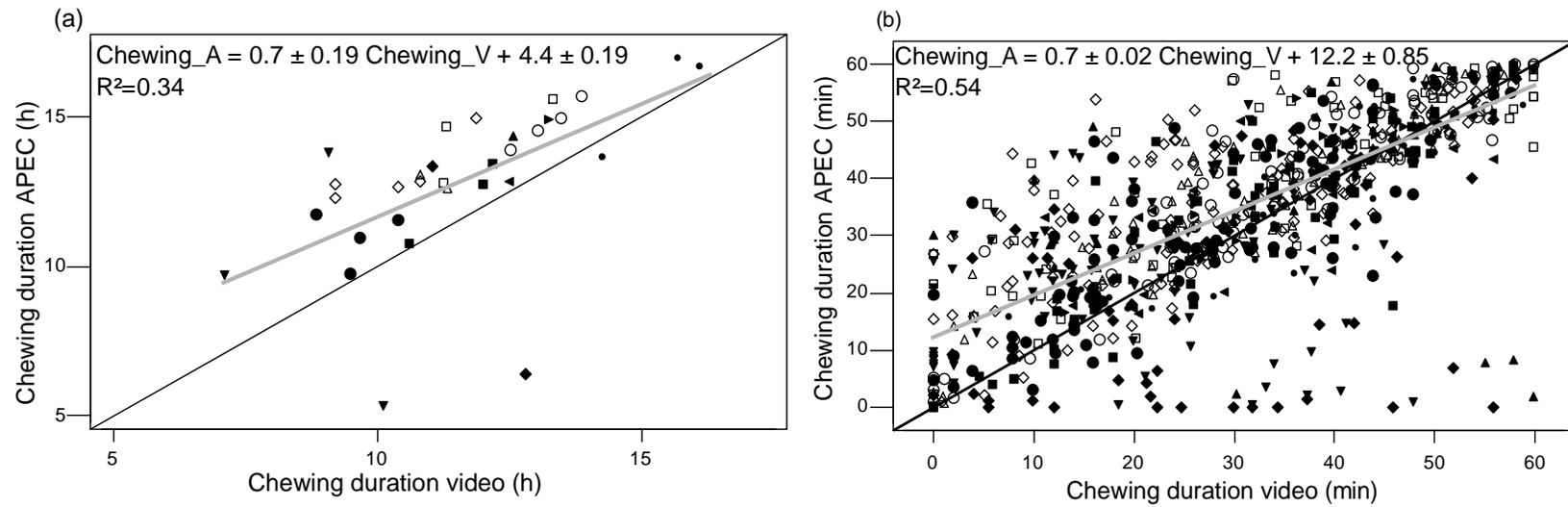


Fig. 3. Linear regression between the net duration of chewing measured by the portable electronic device (APEC: chewing_A) and the video (chewing_V) by one-day ($n = 32$) (a) or one-hour ($n = 779$) (b) intervals. Alpine and Saanen goats are respectively represented by solid and open symbols.

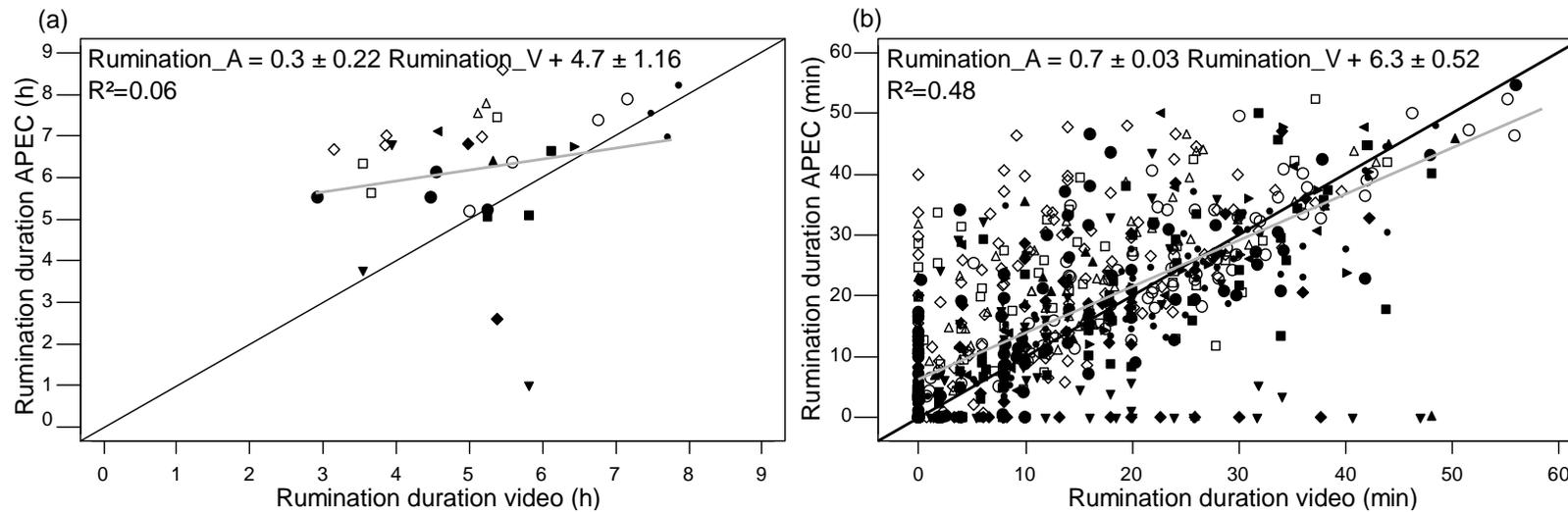


Fig. 4. Linear regression between the net duration of rumination measured by the portable electronic device (APEC: rumination_A) and the video (rumination_V) by one-day (n = 32) (a) or one-hour (n = 779) (b) intervals. Alpine and Saanen goats are respectively represented by solid and open symbols.

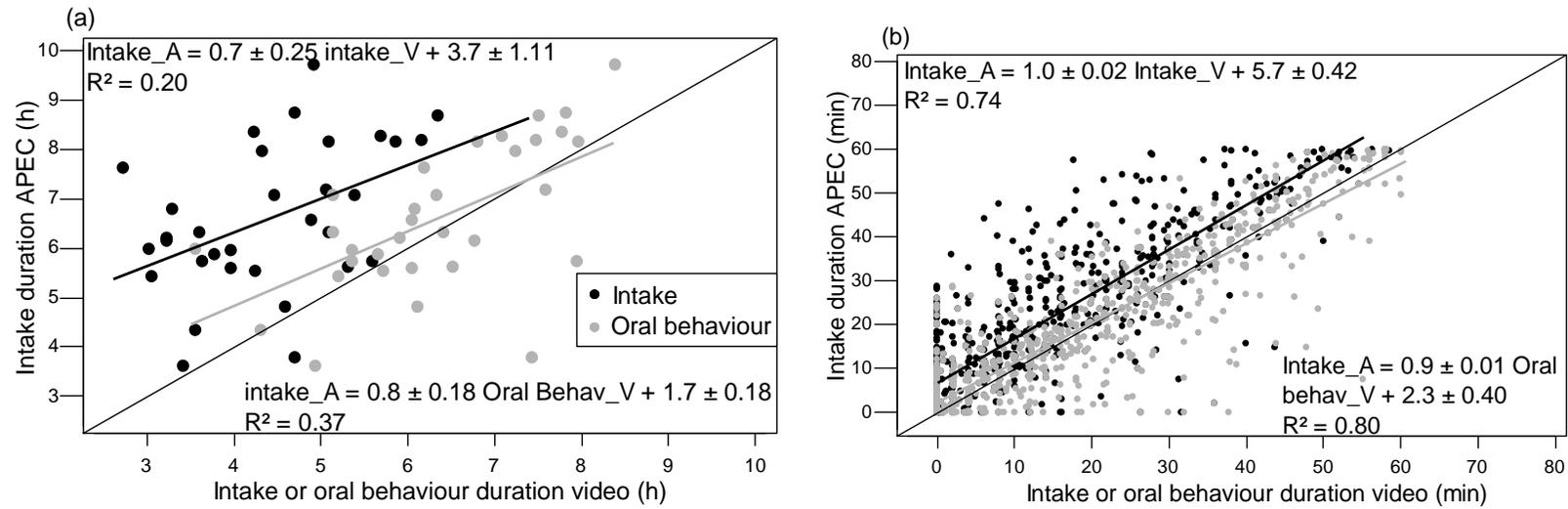


Fig. 5. Linear regression between the net duration of intake measured by the portable electronic device (APEC: intake_A) and the duration of intake (intake_V) or oral behaviour (oral behav_V) measured by the video by one-day (n = 32) (a) or one-hour (n = 779) (b) intervals.

Fig. 4a and b show, for one-day or one-hour intervals respectively, the linear regression between the total duration of rumination measured either with the APEC or with the video. When the daily duration of rumination did not exceed six hours the time spent ruminating was greater when assessed by APEC than by video. The opposite was true if the daily duration of rumination was longer than six hours. The difference in the duration of rumination between the two methods was greater with the Saanen than with the Alpine goats (0.3 and 2.3 hours for Alpine and Saanen goats, respectively, $P = 0.001$ for one-day intervals and 0.7 and 5.7 min for Alpine and Saanen goats, respectively, for one-hour intervals, $P < 0.001$). Assessment of the duration of rumination was also influenced by the time of day. Closer agreement between APEC and video was observed for day-time recording than for night-time recording ($P < 0.001$). This analysis was not performed for the other behaviours because only rumination was more difficult to determine during the night than during the day.

Fig. 5a and b show, for one-day or one-hour intervals respectively, the linear regressions between the time spent eating measured with the APEC and the total duration of intake or oral behaviours measured with the video. For both intervals, the total time spent eating was greater when assessed by the APEC than when assessed by the video. However, the total duration of oral behaviours measured by the video showed good agreement with the total duration of intake measured by the APEC.

All the analysed variables showed better agreement when analysed by one-hour intervals ($R^2 = 0.74$, $R^2 = 0.80$, $R^2 = 0.48$ and $R^2 = 0.54$ for intake, oral behaviours, rumination and chewing, respectively; $n = 779$) than when analysed by one-day intervals ($R^2 = 0.20$, $R^2 = 0.37$, $R^2 = 0.06$ and $R^2 = 0.34$ for intake, oral behaviours, rumination and chewing, respectively, $n = 32$) but a very high variability was observed whatever the variable or interval chosen (R^2 did not exceed 0.80).

3. Discussion

The major practical difference between the two methods is that APEC can be used with free ranging animals, while video is more accurate for stall housed animals. The use of APEC on dairy goats implies daily maintenance of halters, coats, flexible tubing and recording devices. The animals also require at least one week of adaptation before recording can begin. Furthermore, these devices are worn by the animals and might disturb their natural behaviour, or hurt them if not fitted carefully and regularly checked. Video recording allows the

observation of animals without any disturbance. Daily maintenance is limited to changing video tapes when the cameras are correctly installed and the animals only have to be adapted to the pens and the light. The latter inconvenience can be solved by using infrared cameras. Data files from the APEC need to be carefully downloaded to detect abnormal functioning of the device so that these files can be discarded before analysis. However, when all the data files have been checked, the automatic analysis with specific software is easy and rapid. Records from video tapes have to be watched and treated with specific video analysis software, and each animal's behaviour has to be individually encoded, which may take a long time. However, the software allows the videos to be watched at various speeds, which can reduce encoding time for trained personnel. Thus, APEC needs more daily maintenance during the experiment but video requires more analysis time after data collection.

The durations of intake, rumination and chewing were longer than those observed by Kawas et al. (1991) and Morand-Fehr et al. (1980) but shorter than those observed by Geoffroy (1974) or Focant (1984). This is probably due to differences in the percentage of roughage in the diets and the DMI between experiments. The duration of non-ingestive oral behaviours was similar to that observed by Deswysen et al. (1993) in sheep fed restricted amounts of a high concentrate diet. This suggests that non-ingestive behaviours might be a specific response to high concentrate diets. Our results, and especially those obtained with the APEC, agree with those obtained by Abijaoudé et al. (2000) using the same method and with a similar intake of a low forage/concentrate diet. Mean results from our two methods are also in accordance with those obtained by Carvalho et al. (2006) at a similar level of DMI and a 34 % NDF diet. In summary our results show that goat behaviour was not affected by our experimental design compared to other designs and that the use of portable devices does not influence goat behaviour. This last statement is confirmed by our comparison using the same goats with or without APEC. Thus in the present experiment the modifications performed to improve the reliability of the APEC system and the relatively long measurement period did not influence animal behaviour.

The total time spent chewing, eating, or ruminating always showed better agreement between the two methods for the longer rather than for the short daily duration behaviours. Mitlöhner et al. (2001) showed that means obtained with scan sampling at intervals of one to 15 min were similar to continuous observations for long duration behaviours, but that the correlation was lower for behaviours of short duration. Short total daily durations are obviously the sum of many short bouts of intake, oral behaviours or rumination, and thus the deviation due to scan sampling was certainly higher for these short bouts than with longer

ones. As longer total daily durations are certainly linked to longer single bouts, this can explain the better agreement between the two recording methods for long daily durations than for short ones.

The total time spent ruminating was greater for short daily durations when measured by the APEC than when measured by the video. This could be due firstly, to the lower accuracy of scan sampling for short durations than for long ones. Secondly, on the APEC data files, rumination periods are easily determined by their very regular pattern because this behaviour is characterised by its rhythmicity and the regularity of jaw movements (Luginbuhl et al., 1987). On the contrary, it was sometimes difficult to determine, on the videos, if the goats were resting or ruminating, particularly with dark Alpine goats, when the goats were lying or during the night. Some of the goats spent part of the night lying in the dark part of their pen or leaning against the pen wall, which made it difficult to differentiate between rumination and resting. This issue has already been reported with videos or manual observations (Rutter et al., 1997, Abijaoudé et al., 1999). Thus, errors in estimating the duration of rumination were certainly higher due to video analysis than to APEC data file interpretation. Even if the mean difference between the two methods was higher for Saanen than for Alpine goats, the two goats which showed the poorest agreement between the two methods over one-day intervals were actually Alpine goats. Analysis by one-hour intervals also showed more agreement between the two methods during the day than during the night, which is due to the fact that it is more difficult to see what the goats are doing during the night. In conclusion, the APEC system seemed to be a more appropriate than video recording for the assessment of the daily duration of rumination.

The total duration of intake measured by the APEC showed better agreement with the total duration of oral behaviours measured by the video, than with the total duration of intake. Feed intake was more easily determined on the video than rumination because goats usually spent very little time with their heads in the feed trough without eating. Thus, in contrast to rumination, errors in intake determination are greater with the APEC. The present results suggest that feed intake duration was overestimated by the APEC system in stall housed dairy goats fed a high concentrate diet, which is in contrast with the results obtained using the APEC system in ewes at pasture (Béchet et al., 1995). All oral behaviours, except rumination, were considered to be intake by the automatic system during this experiment, which was already observed by Beauchemin et al. (1989) using another portable electronic device also detecting jaw movements. Further analyses of our results showed that the intervals with the highest differences in intake duration between the two systems were intervals containing

mainly intensive intake and very little nibbling as measured with the APEC method. Some goats actually spent quite a long time chewing their coat, their flexible pipes from the APEC, the wire mesh fitted between the individual pens, or licking their cannula or the salt block. It was observed that chewing the coat or the flexible pipes can lead to very intensive chewing and salivation, which was certainly interpreted as intensive intake by the APEC. These observations and the strong agreement obtained between intake duration from the APEC and overall oral behaviour from the video confirmed this hypothesis. Furthermore, during this experiment, the goats probably spent more time performing non-ingestive oral behaviour than less curious animals or animals without a coat or cannula or free ranging animals. Thus, there might be fewer differences in intake duration between APEC and visual observations with calmer animals such as sheep or cattle or free ranging animals, than with goats maintained in individual pens with portable experimental devices. No differences were however found, on a daily basis, between the total duration of non-ingestive oral behaviour performed with and without the coats or the APEC. This could be due to the numerous non-ingestive behaviours which could be performed during our experiment, even without the coats (licking the salt block, social interactions and interactions with the environment...). This issue might be overcome by modifying the software parameters used for automatic intake detection, but this was not the objective of our study and more analysis is needed to conclude on this point. However, even if the duration of intake measured by the APEC did not exclusively represent feed intake, this data is relevant in the estimation of the total amount of saliva entering the rumen, because chewing feed or objects in the environment leads to saliva production, and can therefore influence rumen fermentation. For example, the duration of chewing explains a large part of the daily variations in pH (Giger-Reverdin et al., 2007) observed with diets differing in concentrate percentage. However, when comparing feed intake duration measured by automatic recording systems with measurement of intake using automatic weighing it is possible to distinguish between feed intake and oral behaviours. Direct and selective observation of the animals might also be helpful in determining if the animals frequently perform non ingestive oral behaviours.

High variability was observed for all the variables and for both day- and hour-intervals. This was not due to the effect of a few goats producing outlying values. Firstly, part of this variability could be due to the scan sampling technique, which showed less accuracy for short duration behaviours, and thus might be less reliable for very active than for calmer animals. Secondly, part of this variability might be due to the night intervals when it is more difficult to determine what the goats are doing on the video. Thirdly, elimination of abnormal files was

done visually during data download and some slightly damaged files might have been used for the comparisons. Finally, some goats on some days were more difficult to observe on the video, which might also partially explain the differences observed between Alpine and Saanen goats. The sum of all these causes can explain the variability observed between days, goats and intervals even with data globally showing good agreement between the two methods.

4. Conclusion

Automatic recording of jaw movements and its interpretation appear to be more difficult in dairy goats than in other ruminant species because of the behaviour and activity levels specific to this species. However, both methods (APEC and video) can be used to assess the feeding behaviour of stall housed dairy goats and the choice of the method used will depend on the experimental design or the objectives of the study. APEC needed daily maintenance during the experiment and overestimated feed intake duration by taking into account non-ingestive oral behaviour. This device can however be used in free ranging animals where very little non-ingestive oral behaviour is performed, although group housed animals might damage the devices more often than individually housed animals. Video recording did not require any maintenance during the experiment and did not influence animal behaviour but a long time was needed to watch the video thereafter. The video also has the inconvenience that it is sometimes difficult to determine the different types of animal activity but this latter problem could be overcome by improving lightning or using infra-red cameras. Furthermore, video recording is obviously less accurate for free ranging animals where many cameras are necessary to film the entire surface.

Acknowledgement

We would like to thank J. Tessier, A. Aymard, J. Chevallier, G Durandet, M. Langot and A. Severin from the experimental farm at Grignon for the care of the goats and their technical assistance during the experiment. We also thank P. Piquerel for sewing the coats, C. Reverdin for the modifications of the software, T. Vimal for technical assistance with the APEC and A. Ponter for re-reading the manuscript.

References

- Abijaoudé, J. A., Morand-Fehr, P., Béchet, G., Brun, J. P., Tessier, J., Sauvant, D., 1999. A method to record the feeding behaviour of goats. *Small Rumin. Res.* 33, 213-221.
- Abijaoudé, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P., Sauvant, D., 2000. Influence of forage : concentrate ratio and type of starch in the diet on feeding behaviour, dietary preferences, digestion, metabolism and performance of dairy goats in mid lactation. *Anim. Sci.* 71, 359-368.
- Beauchemin, K. A., Zelin, S., Genner, D., Buchanan-Smith, J. G., 1989. An automatic system for quantification of eating and ruminating activities of dairy cattle housed in stalls. *J. Dairy Sci.* 72, 2746-2759.
- Béchet, G., 1978. Enregistrement des activités alimentaires et méryciques des ovins au pâturage. *Ann. Zootech.* 27, 107-113.
- Béchet, G., Brun, J. P., Petit, M., 1995. Comparison between two methods of measuring the grazing time of ewes. *Ann. Zootech.* 44, suppl.1, 236.
- Brun, J. P., Prache, S., Béchet, G. 1984. A portable device for eating behaviour studies. Page 1-8 in 5th european grazing workshop, Edimbourg, UK.
- Carvalho, S., Rodrigues, M. T., Branco, R. H., Rodrigues, C. A. F., 2006. Comportamento ingestivo de cabras Alpinas em lactacao alimentadas com dietas contendo diferentes niveis de fibra em detergente neutro proveniente da forragem. *Rev. Bras. Zootec.* 35, 562-568.
- Chambers, A. R. M., Hodgson, J., Milne, J. A., 1981. The development and use of equipment for the automatic recording of ingestive behaviour in sheep and cattle. *Grass Forage Sci.* 36, 97-105.
- Dado, R. G., Allen, M. S., 1993. Continuous computer acquisition of feed and water intakes, chewing, reticular motility, and ruminal pH of cattle. *J. Dairy Sci.* 76, 1589-1600.
- Deswysen, A. G., Audic, C., Amouche, E., 1993. Determination de l'indice de fibrosité et certains de ses biais chez le mouton. *Ann. Zootech.* 42, 150.
- Durantou, A., Bueno, L., 1982. Un dispositif simple et fiable d'analyse des mouvements de mâchoires chez les petits ruminants. *Ann. Zootech.* 31, 489-494.

- Focant, M., 1984. Comportement alimentaire, rumination, fermentations réticulo-ruminales et acides gras volatils plasmatiques, comparés chez la chèvre et le mouton; influence du régime. *Reprod. Nutr. Dev.* 24, 239-250.
- Galli, J. R., Cangiano, C. A., Demment, M. W., Laca, E. A., 2006. Acoustic monitoring of chewing and intake of fresh and dry forages in steers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 128, 14-30.
- Geoffroy, F., 1974. Etude comparée du comportement alimentaire et mérycique de deux petits ruminants : la chèvre et le mouton. *Ann. Zootech.* 23, 63-73.
- Giger-Reverdin, S., Rigalma, K., Martin, O., Duvaux-Ponter, C., 2007. Effects of an acidogenic diet on nycthemeral kinetics of feed intake, feeding behaviour and ruminal pH in dairy goats. *Options mediterr., Ser. A* 74, 337-342.
- Girard, V., Labonte, J., 1993. Dispositif d'enregistrement en continu du comportement alimentaire journalier et étude de la variabilité du comportement chez la vache laitière. *Ann. Zootech.* 42, 49-56.
- Kawas, J. R., Lopes, J., Danelon, D. L., Lu, C. D., 1991. Influence of forage-to-concentrate ratio on intake, digestibility, chewing and milk production of dairy goats. *Small Rumin. Res.* 4, 11-18.
- Law, S. E., Sudweeks, E. M., 1975. Electronic transducer for rumination research. *J. Anim. Sci.* 41, 213-218.
- Luginbuhl, J. M., Pond, K. R., Russ, J. C., Burns, J. C., 1987. A simple electronic device and computer interface system for monitoring chewing behavior of stall-fed ruminant animals. *J. Dairy Sci.* 70, 1307-1312.
- Matsui, K., 1994. A new ambulatory data logger for a long-term determination of grazing and rumination behaviour on free-ranging cattle, sheep and goats. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 39, 123-130.
- Mitlöhner, F. M., Morrow-Tesch, J. L., Wilson, S. C., Dailey, J. W., McGlone, J. J., 2001. Behavioral sampling techniques for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 79, 1189-1193.
- Morand-Fehr, P., Hervieu, J., Sauvant, D., 1980. Contribution à la description de la prise alimentaire de la chèvre. *Reprod. Nutr. Dev.* 20, 1641-1644.

- Penning, P. D., 1983. A technique to record automatically some aspects of grazing and ruminating behaviour in sheep. *Grass Forage Sci.* 38, 89-96.
- Ruckebusch, Y., Buéno, L., 1973. Un dispositif simple et autonome d'enregistrement de l'activité alimentaire chez les bovins au pâturage. *Ann. Rech. Vet.* 4, 627-636.
- Rutter, S. M., Champion, R. A., Penning, P. D., 1997. An automatic system to record foraging behaviour in free-ranging ruminants. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 54, 185-195.
- Ungar, E. D., Rutter, S. M., 2006. Classifying cattle jaw movements: comparing IGER Behaviour Recorder and acoustic techniques. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 98, 11-27.

CHAPITRE 3

Modélisation de l'état d'acidose et variabilité du comportement alimentaire

**CHAPITRE 3 : Modélisation de l'état d'acidose et variabilité du
comportement alimentaire**

- 1. Modélisation des chutes d'ingestion dues à de l'acidose sub-clinique chez des ruminants laitiers en élevage intensif,
application aux chèvres**

*Modeling of off-feed periods due to subacute acidosis in intensive
lactating ruminants, application to goats*

- 2. Variabilité intra- et inter-jours du comportement alimentaire
de chèvres laitières en cases individuelles**

1. Modélisation des chutes d'ingestion dues à de l'acidose sub-clinique chez des ruminants laitiers en élevage intensif, application aux chèvres

Des périodes d'« Off-feed », ou « chute d'ingestion », sont observées depuis longtemps dans les élevages intensifs de ruminants, mais elles apparaissent de manière ponctuelle et imprévisible. Or, les études sur l'acidose ont généralement été réalisées pendant des acidoses induites artificiellement par un apport rapide et important de glucides rapidement fermentescibles dans le rumen. Ce type d'approche ne semble cependant pas pouvoir reproduire les effets de crises d'acidoses spontanées et ponctuelles.

Objectifs

→ Etudier l'influence de crises d'acidose spontanées sur la composition du lait et quelques paramètres ruminiaux et sanguins représentatifs de modifications métaboliques et physiologiques.

→ Modéliser l'évolution, d'un jour à l'autre, du pH ruminal, de l'ingestion et de la production pendant les 20 jours suivant le déclenchement d'une crise spontanée d'acidose.

Matériels et méthodes

Dix-huit chèvres en milieu de lactation ont reçu un régime riche en concentré (50 %) pendant 11 semaines. La ration était distribuée deux fois par jour, dans les proportions d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi, conformément à l'intervalle de temps entre les traites.

Les quantités ingérées ont été mesurées quotidiennement, la production laitière cinq jours par semaine, la composition du lait et le poids vif une fois par semaine. Le pH ruminal a été mesuré toutes les minutes par une sonde ruminale et les cinétiques obtenues ont été moyennées sur la journée. Des mesures de paramètres ruminiaux et sanguins ont été réalisées toutes les trois à quatre semaines en cinétiques postprandiales.

Vingt-cinq épisodes d'acidose ont été déterminés sur la base des variations journalières de matière sèche ingérée, de production laitière et/ou de pH ruminal. Le jour de déclenchement a été calé par rapport à la chute initiale de pH ou de matière sèche ingérée. La modélisation a porté sur 25 jours : de cinq jours avant le début de l'épisode à 20 jours après.

Résultats

Les taux butyreux et protéiques ont été négativement corrélés aux quantités ingérées lors des crises d'acidose, tandis que l'inverse a été observé pour la production de lactose. Des valeurs faibles d'ingestion pendant les crises ont été corrélées à des valeurs faibles de pH et de bicarbonates sanguins, d'acides gras volatils ruminiaux, et à des valeurs élevées d'acides gras non estérifiés plasmatiques.

Les crises d'acidose ont été initiées par une chute très rapide et importante du pH ruminal, qui a atteint, dès le jour suivant, des valeurs supérieures à celles mesurées avant la crise. La chute de pH a été suivie d'une chute d'ingestion et d'une chute de production atteignant leurs minima respectivement deux et trois jours après le début de l'acidose. Les niveaux d'ingestion et de production ont atteint leurs valeurs d'avant la crise environ 20 jours après son déclenchement. Le bilan énergétique cumulé depuis le début de l'épisode est resté négatif pendant plus de 10 jours.

Discussion et conclusion

- Les paramètres ruminiaux et sanguins montrent que les fermentations ruminales ont été réduites pendant les épisodes d'acidose, tandis que les réserves corporelles ont été mobilisées.

- L'augmentation des taux butyreux et protéiques proviendrait d'une concentration du lait en matière grasse et en protéines suite à la chute de volume de lait produit. L'augmentation proportionnellement supérieure du taux butyreux par rapport au taux protéique semble être due à la mobilisation des réserves corporelles.

- L'augmentation du pH ruminal, jusqu'à des valeurs supérieures à 6,5, après une chute brutale, est principalement due à la chute d'ingestion, et à une augmentation de la durée de mastication par gramme de matière sèche ingérée, ce qui a augmenté la quantité de salive (et donc, de substances tampons) entrant dans le rumen.

- Les dynamiques présentées ici sont très différentes des dynamiques observées lors d'induction artificielle d'acidose, et montrent que les épisodes spontanés d'acidose peuvent influencer la production de l'animal pendant plus de 20 jours.

- Ce modèle constitue une première approche vers un modèle plus mécaniste de l'acidose sub-clinique.

Modeling of off-feed periods due to subacute acidosis in intensive lactating ruminants, application to goats

M. Desnoyers*¹, S. Giger-Reverdin*, C. Duvaux-Ponter* and D. Sauvant*.

*UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

¹ Corresponding author: Marion Desnoyers, UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France

Tel +33 (0)1 30 81 52 12, fax +33 (0)1 30 81 52 17,

email: marion.desnoyers@agroparistech.fr

Interpretive Summary

Modeling off-feed periods due to acidosis. Desnoyers. Subacute rumen acidosis often leads to off-feed periods in intensive ruminant production. Evolution of day-to-day variations in rumen pH, feed intake and milk production during spontaneous off-feed periods was modeled in dairy goats using a simple compartmental model. Bouts of acidosis started by an abrupt pH drop, followed by delayed feed intake and milk yield drops. The pH drop was followed by several days of high rumen pH. The evolution of milk composition and of some rumen and blood parameters showed that rumen fermentations were reduced and that body reserves were mobilized during these spontaneous bouts of acidosis.

Soumis au Journal of Dairy Science

ABSTRACT

Off-feed periods due to subacute rumen acidosis are often observed in intensive ruminant production but appear in a fairly unpredictable manner. The objectives of this paper were firstly, to study the influence of spontaneous off-feed periods due to bouts of acidosis on milk composition and on some rumen and blood parameters showing metabolic or physiological modifications, and secondly, to model the day-to-day variations in rumen pH, dry matter intake (DMI) and milk production during these bouts of acidosis. Twenty-five spontaneous off-feed periods were detected in an experiment performed in 18 mid-lactating goats fed a high concentrate diet during 11 wk. Milk composition and rumen and blood parameters were not measured daily and therefore could not be used in the modeling process. However, during off-feed periods, milk fat and protein contents were negatively correlated with DMI, while milk lactose content was positively correlated with DMI. A low DMI was also linked to low blood pH and bicarbonates and low rumen volatile fatty acids but high levels of plasma non-esterified fatty acids. This indicates that rumen fermentations were reduced and body reserves mobilized during bouts of acidosis. DMI, milk production and rumen pH were measured daily during the experiment which allowed to model the day-to-day evolution of these 3 parameters during spontaneous bouts of acidosis. Bouts started with a very quick pH drop (1 d) followed by several days of relatively high rumen pH (greater than 6.5) before recovery of pre-acidosis value. The pH drop was followed by a DMI drop reaching a nadir around 2 d after the start of the episode, and a raw milk yield drop reaching a nadir 3 d after the beginning of the episode. The high rumen pH was mainly due to the relatively low decrease in daily chewing time during the DMI drop. Therefore, chewing time per unit of DMI increased, which probably increased the buffer supply per unit of DMI. DMI and milk yield needed around 20 d to recover the pre-acidosis values. Energy balance also showed a drop during DMI and milk yield drops but was recovered more rapidly than DMI and milk yield. However, energy balance cumulated from the start of the bouts of acidosis remained negative during more than 10 d. This analysis showed that spontaneous bouts of acidosis in intensive dairy ruminants can have a great influence on animal production and health during at least 3 wk, and can thus represent an important economic loss.

Key words: off-feed, acidosis, modeling, dairy goats

INTRODUCTION

Off-feed periods due to subacute rumen acidosis (**SARA**) are often detected in intensive ruminant production (Uhart and Carroll, 1967, Tremere et al., 1968) and appear in a fairly unpredictable manner. They represent an important economic loss for the farmers and can heavily alter the future production and health of the animals. Acidosis is usually defined by mean rumen pH but this parameter cannot be considered as a full descriptor of rumen acidosis (Dragomir et al., 2008). The causing role of diets highly digestible and poor in fiber has been recognized a long time ago (Uhart and Carroll, 1967, Tremere et al., 1968). However, experimental study of spontaneous SARA is difficult because bouts of acidosis cannot be scheduled and studied through a balanced design. Therefore, acidosis has been frequently experimentally induced by a sudden ruminal supply of easily fermentable carbohydrates in steers (Brown et al., 2000), sheep (Krehbiel et al., 1995), cows (Keunen et al., 2002, Krause and Oetzel, 2005) or goats (Cao et al., 1987). However, the global syndrome could be only partially studied by this approach. Although erratic DMI was evoked in some sub acidotic situations (Nocek, 1997), the evolution of mean daily DMI and milk yield, during episodes of SARA, was seldom mentioned (Keunen et al., 2002, Krause and Oetzel, 2005) and never precisely described. Only Schwartzkopf-Genswein et al. (2003) described rumen pH and daily DMI patterns during acute and subacute acidosis but only in 1 beef steer. Several mechanistic models of either rumen biochemistry (Lescoat et al., 1996) or intake regulation in ruminants (Mertens, 1996) have already been published. However, none of them actually considered the issue of modeling the SARA process. To progress in modeling the dynamic aspects of off-feed periods due to spontaneous SARA, it was decided to focus on the spontaneous off-feed periods which were observed during an experiment aimed at studying the influence of an acidogenic diet on feeding behavior and rumen digestion in lactating goats.

MATERIALS AND METHODS

Animals and Housing

Eighteen dairy goats in mid lactation (8 Saanen and 10 Alpine including 12 cannulated goats) which have never been included in an experiment on acidosis were used. They were kept in 2 m*1 m individual pens during the experiment which was conducted under the guidelines given by the French Agriculture Ministry. The composition of the total mixed ration (TMR) offered is given in Table 1. Energy and nitrogen values of the diet were

Table 1. Composition and analysis of the experimental diet

	diet
<i>Composition (% DM):</i>	
Grass hay	35
Sugarbeet pulp	15
Concentrate blend ¹	50
Dry Matter (%)	63
Net Energy MJ/kg DM ²	6.48
PDIN g/kg DM ²	95
PDIE g/kg DM ²	103
<i>Analysis (% DM)</i>	
NDF	34.7
ADF	15.91
ADL	1.84
Mean particle size (d50)	1.80

¹ 25% wheat, 25% barley, 30% maize, 15% soyabean meal, 3% molasses and 2 % mineral premix (8-25-4)

² Calculated from the INRA tables (Baumont et al., 2007)

calculated according to the INRA tables (Baumont et al., 2007). Goats were fed twice daily after milking, in the proportion of two thirds at 4 p.m. and one third at 8 a.m., according to the time interval between milkings. Quantities offered were adjusted weekly to ensure 10 % refusals. Animals started receiving the experimental diet after 2 wk of adaptation to the individual pens and 1 wk of transition diet between a 20 % concentrate diet and the experimental one. They were fed the experimental diet during 11 wk.

Experimental Measurements

Weight and Production. Animals were weighed weekly. Offered feed and refusals were individually weighed daily, which allowed the assessment of DMI. To correct data from the BW influence, DMI was calculated daily in gram per kilogram of body weight (**DMIBW**) using the value of the last previous weighing (maximum interval of 1 wk). Raw milk yield (**RMY**) was recorded 5 d out of 7 and also calculated in gram per kilogram of body weight (**RMYBW**). Milk fat, protein and lactose contents (**MFC**, **MPC** and **MLC**, respectively) were analyzed once a week on 2 successive milkings. Energy balance (**EB**) was calculated 5 d out of 7 using the BW of the last previous weighing (maximum interval of 1 wk) and the milk composition of the last previous sampling (maximum interval of 1 wk). It was also calculated in kilojoules per kilogram of BW (**EBBW**).

Continuous Measurements. Starting 1 wk before the beginning of the experiment each of the 12 cannulated goats was accustomed to wearing a coat and a leather halter. When measured, rumen pH was monitored continuously by a self cleaning pH probe (accuracy = 0.01 pH unit, Fisher Bioblock Scientific, France) fitted in the rumen through the cannulae and linked to a portable device (Easy Log EL-2, Omega engineering. inc) (Brossard et al., 2003a) placed in one of the coat pockets and recording the pH every minute. Due to some technical problems, pH was not measured every day in every goat. When at least 21 h have been recorded for 1 goat the mean daily pH value was calculated and used for the analysis. Chewing was recorded daily using a portable electronic system (APEC) fitted under the lower jaw and adapted from the one used by Brun et al. (1984). The recording device was placed in the other coat pocket. APEC data files were analyzed by a specific software written at INRA Theix (France) classifying chewing activity bouts as rumination, intake or nibbling. These data allowed the calculation of daily durations of chewing. The index of mastication (**IM**) was

calculated as the mean daily chewing duration (min) per kilogram of DMI. The intake rate (**IR**) was calculated as the mean daily DMI (g) eaten per min of daily intake.

Physiological Measurements. Four sampling kinetics were performed every 2 to 3 wk. Every kinetic consisted in:- blood samples for pH, bicarbonates (HCO_3^-), electrolytes (Na^+ , K^+ and Cl^-) analyses and Non Esterified Fatty Acids (NEFA) analysis on plasma and - rumen samples for VFA and acetate to propionate ratio analyses. Samples were taken before the morning feeding and 1, 2, 4 and 6 h thereafter. Electrolytic balance in blood (**ELB** (mmol/l) = $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$) was calculated. All these parameters were averaged for sampling times 2, 4 and 6 h.

Detection of Off-Feed Periods due to Acidosis

Daily changes in DMI and RMY were used to detect off-feed periods related to bouts of acidosis. Firstly, for each goat, days with a DMIBW or RMYBW not included in the interval mean $\pm 1.5 \times \text{SD}$ (calculated for each goat) were selected. Secondly, days with a drop in DMIBW between 2 consecutive days greater than 10 g/kg BW were checked off. Thirdly, days with a mean pH lower than 6.0 were also checked off. Finally, a goat was considered as experiencing a perturbation if at least 2 parameters out of pH, DMIBW and RMYBW were checked off at the same time or during at least 2 consecutive days. The end of the bout was determined as the last one of checked-off days. When rumen pH was available, it was observed that the drop in DMIBW occurred approximatively the day after the minimum pH value. Thus, when pH was available, the check-off day with the minimum pH value was considered as d 0. If pH was not available, the check-off day for the DMIBW drop was considered as d 1. Days were labeled from - 5 to 25 if 25 d after the start point were available. Days - 5 to - 1 are presented as the pre-period. By doing this, 25 episodes were selected which will be called SARA thereafter. Only 3 goats out of 18 did not present any off-feed episodes. Nine goats showed 1 episode, 4 goats showed 2 episodes, 1 had 3 episodes and the last one 4.

Eight detected episodes had almost complete daily kinetics of rumen pH (7 to 20 d available, 14 d on average) with a measured value at d 0. They were pooled and called “**group pH**”. To study the influence of acidosis intensity, the set of 25 detected episodes was divided into 3 groups of 8 or 9 episodes according to the importance of the mean DMIBW drop during the days 1 to 5, expressed as a percentage of the mean pre-period value of DMIBW value: low (group 1: $17.2 \pm 13.8 \%$), middle (group 2: $29.0 \pm 13.9 \%$) and high (group 3: $72.0 \pm 12.7 \%$).

The 8 animals of the group pH are dispatched among these 3 groups. Five are in group 3, 2 in group 2 and 1 in group 1.

RESULTS

Response of Less Measured Parameters

For the parameters which were not measured daily, the number of observations was not sufficient to be included in the modeling process. Therefore, the most important ones were studied in relation to the key variable: the level of DMIBW. DMIBW was chosen because it is more related to these parameters than RMYBW. These within episode relationships were analyzed using GLM procedure (Minitab, version 12.2, 1995, Minitab Inc.).

Figure 1 shows that, within goats, IM (344 ± 111 min/kg DMI, on average) was negatively correlated with DMIBW. In contrast, the relationship between DMIBW and total chewing duration was not significant. Intake rate (6.1 ± 2.2 g DMI/min, on average) was positively and curvilinearly related to DMIBW, stressing that a low IR is one of the determinants of the decrease in daily DMI. Milk composition was also significantly altered during a spontaneous episode of SARA (Figure 2). MFC (38.0 ± 7.92 g/kg, on average) was significantly increased as DMIBW decreased: $MFC = 47.3 - 0.24 \text{ DMIBW}$ ($n = 91$, number of episodes (**nepisode**) = 25, root mean square error (**rmse**) = 5.2). A similar relationship was observed for MPC (32.6 ± 3.75 g/kg, on average): $MPC = 35.6 - 0.07 \text{ DMIBW}$ ($n = 91$, nepisode = 25, rmse = 2.1). The within-episode regression slope was lower for MPC than for MFC, therefore the milk fat to protein ratio increased as DMIBW decreased. In contrast, MLC (48.2 ± 2.90 g/kg, on average) was positively correlated with DMIBW: $MLC = 45.4 + 0.07 \text{ DMIBW}$ ($n = 83$, nepisode = 24, rmse = 1.3). For these 3 milk components, 1 observation had to be removed, because one of the goats exhibited a DMIBW of only 2.4 g/kg BW and presented aberrant values for milk composition (MFC = 101.8, MPC = 44.0 and MLC = 30.3 g/kg). However, the goat survived to this strong off-feed episode.

A principal component (**PC**) analysis was performed on the 21 d of SARA bouts on which rumen and blood parameters were measured and DMIBW was added to the rumen and blood variables. The first PC explained more than half of the total variation (Figure 3) and indicated that low levels of DMIBW were associated with low values of blood pH, ELB and HCO_3^- contents. In contrast, low DMIBW was associated with an increase in NEFA suggesting

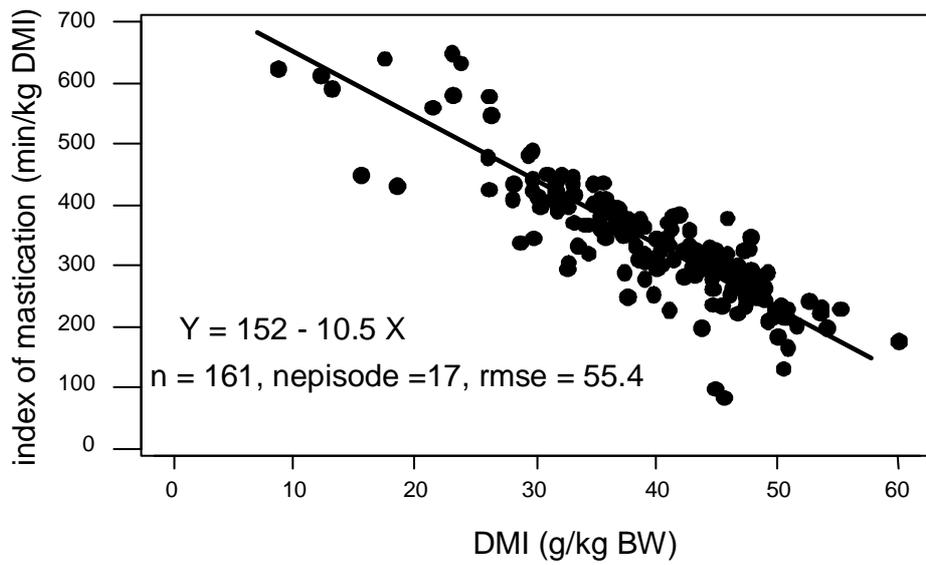


Figure 1. Relationship between index of mastication and dry matter intake during spontaneous bouts of acidosis observed in dairy goats.

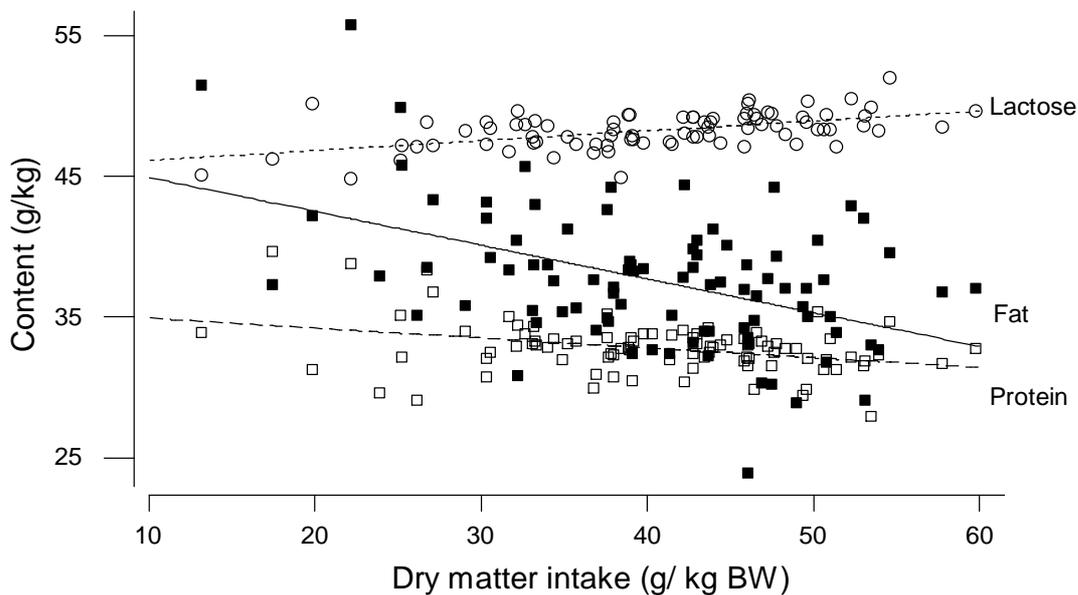


Figure 2. Within-episode relationship between milk composition and dry matter intake during spontaneous bouts of acidosis observed in dairy goats (○: milk lactose content, ■: milk fat content, □: milk protein content, equations in the text).

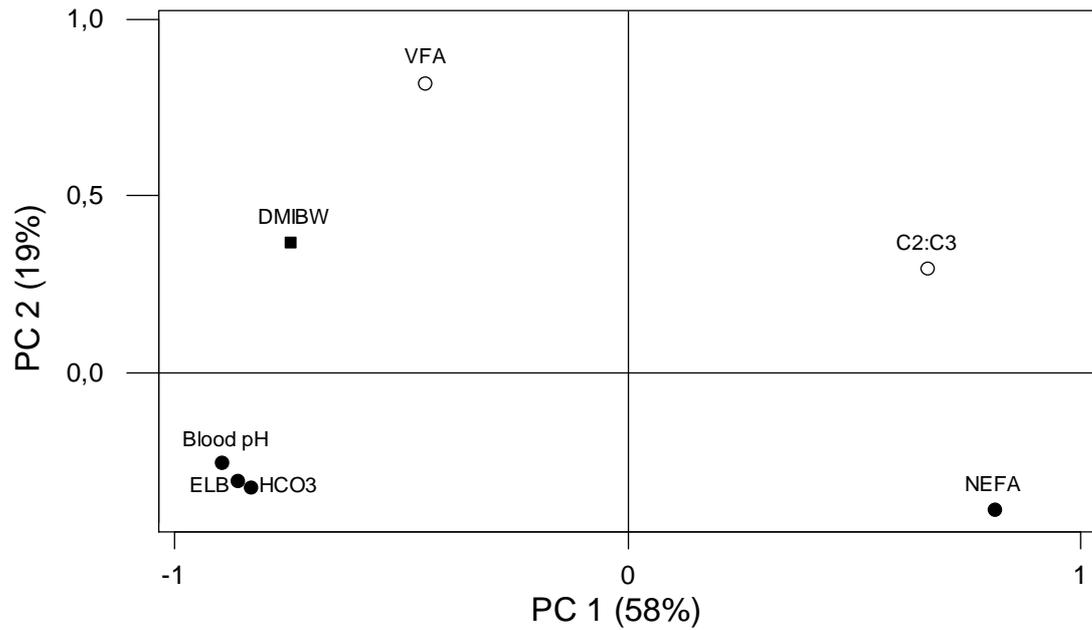


Figure 3. Correlations between the principal components 1 and 2 and rumen parameters (○) (VFA and C2 to C3 ratio (C2:C3)); blood parameters (●) (pH, electrolytic balance (ELB), bicarbonates (HCO₃) and NEFA) and DMIBW (g/kg BW, ■) during spontaneous bouts of acidosis observed in dairy goats.

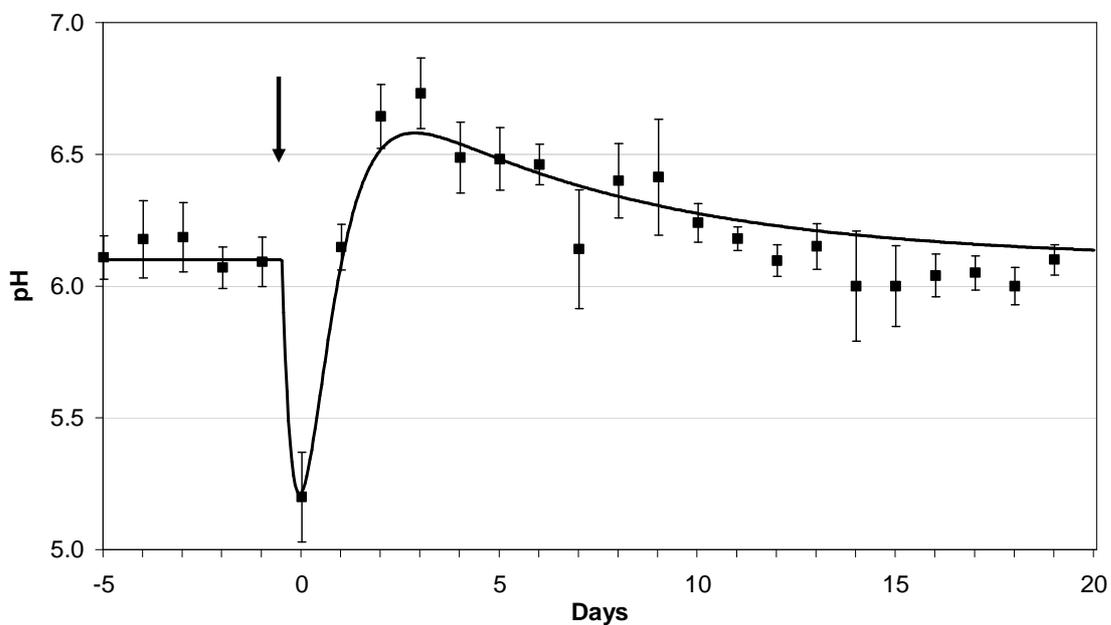


Figure 4. Evolution of rumen pH during spontaneous bouts of acidosis observed in dairy goats (observed values \pm SE. The continuous line represents the fitted model and the arrow the episode start). The arrow represents pulse time

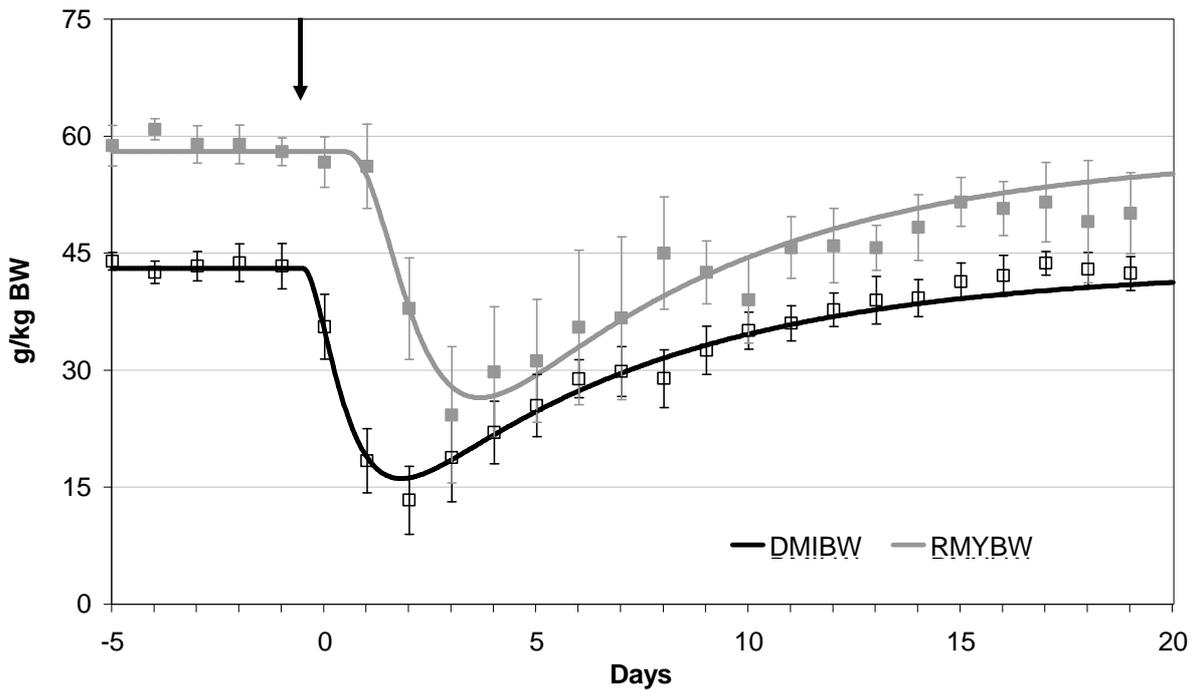


Figure 5. Evolution of intake (DMIBW) and milk yield (RMYBW) during spontaneous bouts of acidosis observed in dairy goats (observed values \pm SE. The continuous line represents the fitted model and the arrow the episode start). The arrow represents pulse time

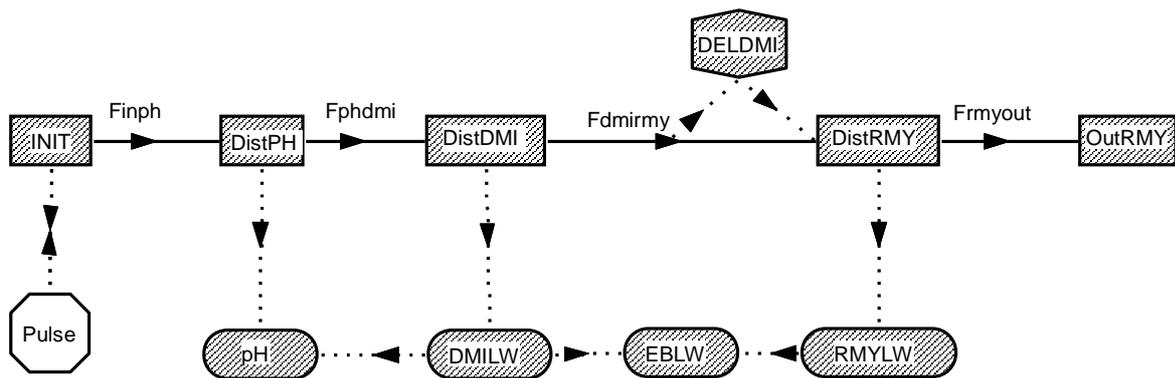


Figure 6. Diagram of the model used to model pH, intake (DMIBW), milk yield (RMYB) and energy balance (EBBW) evolution during spontaneous bouts of acidosis observed in dairy goats. Compartment and flux significations are presented in appendix.

lipomobilization. VFA concentration in the rumen was positively correlated with DMIBW and negatively correlated with acetate to propionate ratio, indicating a low fermentation rate.

Modeling Daily Kinetics of SARA Episodes

Only the 8 episodes of group pH were used in a first modeling approach. Mean daily values (\pm standard errors) of rumen pH, DMI and RMY are presented in figures 4 (pH) and 5 (DMI and RMY). Figure 4 shows that, after a pre-period of fairly steady value, the sudden pH drop at d 0 was followed by a quick recovery period and pre-period pH value was recovered as soon as the next day (d 1). Moreover, during the following days, pH became greater than the mean pre-period value and returned progressively, within 10 d, to this value. Figure 5 shows that the drop in DMIBW was more progressive and appeared to be delayed in comparison to the pH one. The minimum was achieved around d 2 but the day of minimum rumen pH can be variable between SARA episodes. The recovery of DMIBW was much smoothed than the pH one without any rebound above the pre-period values. Pre-period level of DMIBW was recovered only around d 18. The kinetic of RMYBW appeared also to be delayed in comparison to the DMIBW one. The minimum value was achieved at around d 3 and the pre-period production level was never reached in the considered range of time.

A simple compartmental model was built using ModelMaker (version 3 Cherwell Scientific Ltd) to fit simultaneously the kinetics of daily variations in rumen pH, DMIBW and RMYBW. Figure 6 presents the diagram of the model. Differential equations and parameters definitions are presented in the appendix and parameters values are presented in Table 2. The basic principle consisted in building a dynamic compartmental structure providing waves of coordinated and successive disturbances of pH, DMI and RMY. These waves were obtained by the transfer of a dimensionless quantity of matter among successive compartments, according to mass action laws. An initial disturbance occurring after a pre-period of steady state situation induced the waves. The value of this initial pulse of matter was considered to be a priori proportional to the importance of the disturbance and was impulsed into the initial compartment (**INIT**). This **INIT** compartment transfers its matter content into the compartment of pH disturbance (**DistPH**). This last compartment provides its matter to the compartment of DMI disturbance (**DistDMI**) which feeds a compartment of RMY disturbance (**DistRMY**). This last transfer is submitted to a delay. Finally, the **DistRMY** compartment loses its matter into a last compartment of accumulation (**OutRMY**). The state variables of the compartments **DistPH**, **DistDMI** and **DistRMY** are multiplied by scale

Table 2. Values of the parameters adjusted for group pH and the three groups of bouts of acidosis differing by the intensity of the perturbation

Parameter ¹	Group pH ²	Group 3 ³	Group 2 ³	Group 1 ³
Pulse	421	537	264	155
pulse time (h)	108	115	113	106
kinph (1/h)	0.006	0.007	0.009	0.005
kphdmi (1/h)	0.074	0.084	0.112	0.095
kdmirmy (1/h)	0.076	0.080	0.124	0.078
deldmi (h)	22.3	16.9	18.0	28.1
krmyout (1/h)	0.061	0.060	0.116	0.059
aimast	0.094	0.087	0.163	0.131
aph	0.078	0.079	0.126	0.110
admi	1.00	1.00	1.00	1.00
army	1.00	0.99	0.89	0.44
admieb	2.02	2.02	2.38	1.97
armyeb	1.47	1.43	1.57	1.45
pH0	6.10	6.15	6.06	5.97
DMIBW0 (g/kg BW)	43	45	43	44
RMYBW0 (g/kg BW)	58	65	60	54
rmse ⁴	1.57	2.61 (3.16)	1.93 (3.27)	1.80 (1.84)

¹ Parameter definitions are in the appendix.

² Eight bouts of acidosis with complete pH kinetic.

³ Group 3: high perturbation to group 1: low perturbation

⁴ Between brackets: the rmse obtained with the values of the parameters estimated for group pH, except the pulse one which was adjusted

parameters (aph, admi and army) and subtracted to the pre-period values of pH, DMIBW and RMYBW respectively, to obtain the simulated values. If only these successive events were used to build the model, the pH kinetic remained too low and did not exhibit any rebound. This was due to a lack of consideration of the close and inverse relationship observed through the whole database between the level of DMI and the IM (Figure 1). This index of mastication can be considered as proportional to the saliva and buffers recycled per kilogram of DMI. Therefore, it was assumed that the pH rebound was the outcome of an intense buffer recycling per unit of DMI and of a decrease in the fermentable organic matter intake during the SARA episode. To include these aspects in the model, the pH value was represented as a function of both DistPH and DMIBW (appendix). By doing this, a much more satisfactory response in pH kinetic was observed (Figure 4).

As such, the model has to fit 15 parameters (Table 2 and appendix). Results of fitting are presented in Table 2 (first column) and in Figures 4 and 5 together with the observed values. As a first step, only the initial values of pH, DMIBW and RMYBW from d - 5 to - 1 were calculated and then the 12 remaining values were fitted in several phases. The root mean square error of the model adjustment was of 1.57. The adjusted time of the initial input (pulse value = 421) was of 108 h. The minimum simulated values for pH, DMIBW and RMYBW occurred at 11 h (pH_{min} = 5.21), 56 h (DMIBW_{min} = 15.6 g DMI/kg BW) and 109 h after the initial pulse (RMYBW_{min} = 27.8 gRMY/kg BW), respectively. Thus the outcoming delay between minimum values of pH and DMIBW was of 45 h. It was of 53 h between the minimum values of DMIBW and RMYBW. After the initial adjustment, a last one was performed to fit the 2 parameters (admieb and armyeb) applied to DMIBW and RMYBW to estimate the kinetic of the daily net energy balance. The kinetic of EBBW was also characterized by a drop with a nadir on d 1, followed by a recovery phase more rapid than those of DMIBW and RMYBW. This phase allowed to reach 0 around d 4 and to stay around equilibrium until the end of the 20 modeled days. At d 10, the cumulated EBBW since d 0 remained largely negative around - 481 kJ/kg BW.

Modeling the Intensity of the Disturbance

To assess the ability of the model to be adapted to various disturbance intensities, the 3 groups were used separately. Mean levels and standard errors of pH, DMIBW and RMYBW were not different during the pre-period between the 3 groups. Differences between the 3 groups for RMYBW were not significant due to the limited number of animals. However the

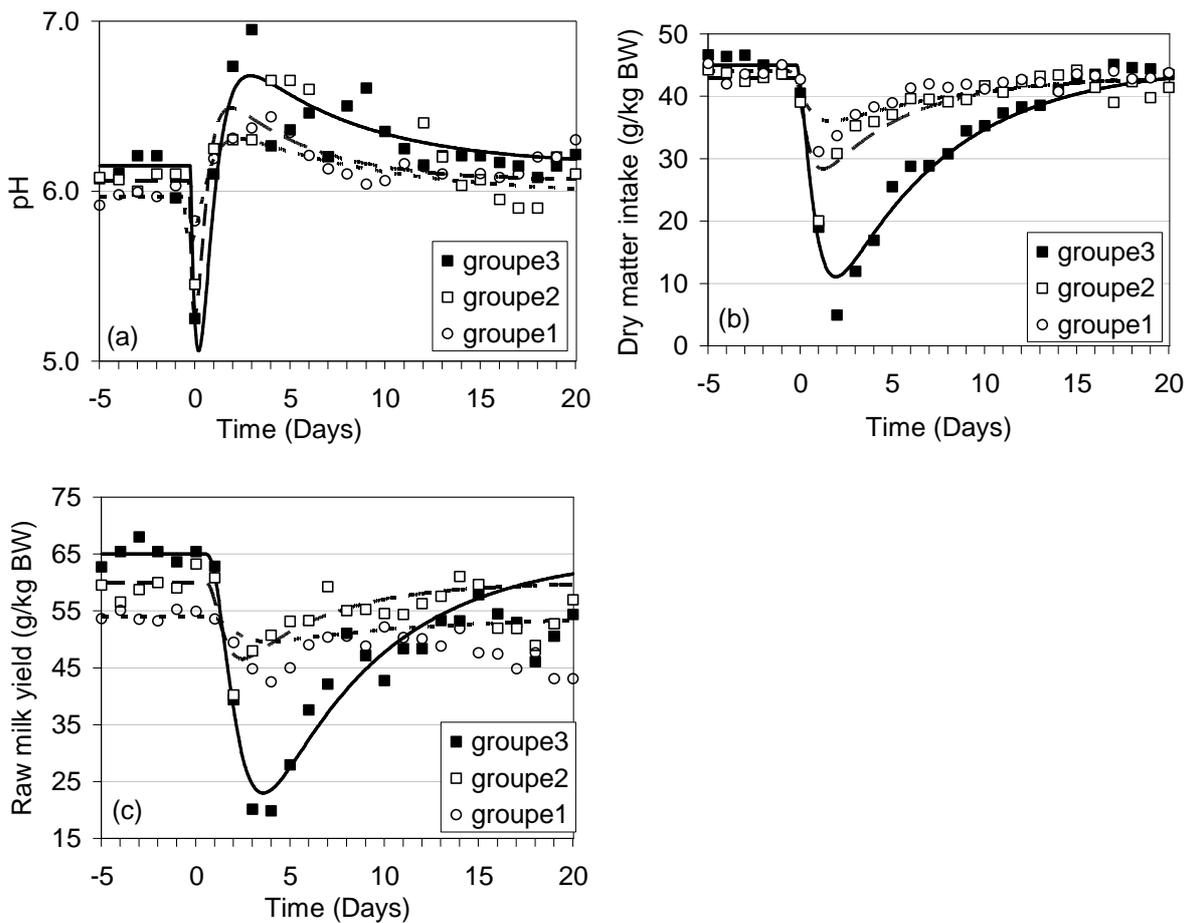


Figure 7. Evolution of (a) pH (b) DMIBW and (c) RMYBW for the three groups of bouts of acidosis, observed in dairy goats, and differing by the intensity of the perturbation (group 3 high to group 1 low). The marks are observed values and continuous line represents the fitted model.

drop in DMIBW (**DropDMIBW**_{preperiod to 1-4}), calculated as the mean DMIBW drop during the days 1 to 4 expressed as a percentage of the mean pre-period value, was correlated to the mean RMYBW level from days -5 to -1 (**RMYBW**_{-5to-1}): $\text{DropDMIBW}_{\text{preperiod to 1-4}} = 0.30 \times \text{RMYBW}_{-5to-1}$ ($n = 25$, $R^2 = 0.2$, $\text{rmse} = 11.8 \text{ g/kg BW}$). This indicates that higher producing goats had more severe SARA than low producing ones.

The previous model was fitted separately to the 3 groups for pH, DMIBW and RMYBW. In a first phase, for each of them, only the value of the initial pulse was adjusted, the other parameters being the same as for the previous adjustment (group pH). After that, a second phase of fitting was undertaken to try to improve the rmse. The values obtained are presented in columns “group 3”, “group 2” and “group 1” of Table 2. When adjusting only the pulse value, the rmse increased, especially for groups 2 and 3. However, the improvement of rmse was not large for groups 1 and 3 when all the parameters were adjusted. Moreover, the values for the adjusted parameters presented the same order of magnitude among the 3 groups. The only exception concerns “army” (scale parameter between DistRMY and RMYBW values) which was smaller for group 1 than for the other two. This suggests that the impact of SARA was lower on RMYBW than on DMIBW for this group 1 in comparison to the other two. Thus, except for RMYBW₀, there were no significant relationships between the pulse values and the values of the other adjusted parameters.

Figure 7 (a, b and c) presents the observed and simulated patterns of DMIBW, RMYBW and pH for the 3 groups, respectively. The minimum values observed for DMIBW and RMYBW were systematically lower than the simulated ones. This suggests that there could be a transitory mechanism which amplified the drops in DMI and RMY beyond those taken into account by the model. During the 20 d of the modeled episodes, the loss in RMYBW, compared to the RMYBW of the pre-period, was of 5.3, 4.4 and 19.5 g/kg BW (or 10.0, 7.2 and 30.0 %) for the animals of groups 1, 2 and 3, respectively.

A study focused on the 6 goats having experienced more than 1 SARA episode showed that the severity, calculated as the mean DMIBW drop during the days 1 to 4, expressed as a percentage of the mean pre-period value of DMIBW, was lower for the second episode, than for the first one ($21.0 \pm 10.7 \%$ vs $57.4 \pm 29.5 \%$, respectively, $P = 0.017$).

DISCUSSION

Detection of SARA bouts in this experiment was essentially based on intake and milk yield drops rather than on low rumen pH values mainly because of the numerous days without

sufficient rumen pH data. However, the 8 episodes including enough rumen pH data showed that these off-feed periods were induced by low rumen pH and were thus the outcome of the subacute acidosis status of the animals. Nevertheless, the mean value of rumen pH during the whole modeled period (6.2 for group pH) was above the threshold value of 6.0 usually used for SARA determination (Nocek, 1997, Oetzel, 2000) and mean rumen pH for the group pH was above 6.4 during 5 d. It is thus difficult to determine if these bouts can be actually called “bouts of acidosis”. However, as the initial disturbance was the pH drop, we assumed that these off-feed periods represented what really happens in herds experiencing subacute acidosis and were therefore called SARA episodes.

In the present experiment, goats received a TMR with a high proportion (65 % of DM) of components rich in energy (concentrate and sugarbeetpulp). During the 11 wk of the experiment, 25 episodes of SARA were detected. The proportion of experimental days checked off was of 12 %, and the proportion of experimental days used for modeling was of 43 %. It is somewhat surprising that so many episodes of SARA were observed with a dietary NDF of 34.7 %, which is slightly above the current recommendations of 30 % to 35 % of DM (Sauvant et al., 1999). This could be due to the high energy content of the diet, particularly with 12.5 % of wheat, 12.5 % of barley and 15 % of sugarbeetpulp. These 3 feedstuffs are known to be acidogenic (Giger-Reverdin et al., 2002, Sauvant et al., 2006). Moreover, the geometric mean of particle size of the present diet was low (1.80 mm) which probably increased the risk of SARA (Sauvant, 2000).

Modeling kinetics of SARA episodes suggests the occurrence of several successive phases of disturbances and adaptations. The quality of the fitting stresses the relevance of the theoretical part of the model providing a frame of successive biological events following first order processes through the 3 compartments of mixing: DistPH, DistDMI and DistRMY. An interesting result from this model is that the value of the initial pulse is the only parameter which allows to integrate the severity of the episode. This suggests that the regulation process seemed to be similar whatever the severity of the episode. Due to an insufficient number of measurements for some explicative variables, for example milk composition or ruminal parameters, the present model remains largely empirical. However, the interesting relationships which were obtained between DMIBW and these variables leads us to consider that it is a first step in building a more mechanistic model of spontaneous SARA episodes in ruminants fed high concentrate diets. Daily measurements of these less measured parameters in further experiments will certainly allow to improve the model by the addition of these parameters.

SARA is generally observed with diets low in fiber and high in energy (Uhart and Carroll, 1967, Tremere et al., 1968) or with excessive highly fermentable carbohydrates (Krause and Oetzel, 2006). This is why SARA was often experimentally induced by a sudden rumen load of rapidly fermentable carbohydrates (Brown et al., 2000, Keunen et al., 2002, Krause and Oetzel, 2005). In our experiment, the initial cause of SARA appeared to be located in the rumen and resulted in an abrupt pH drop. The challenge is to find out more precisely what were the initial digestive or behavioral disturbances at the origin of a spontaneous SARA episode and to try to find indexes predicting the probability, and possibly the severity of a SARA episode. Krause and Oetzel (2006) reported that total DMI was a major determinant of rumen pH, but in our experiment the level of DMIBW could not be related to the severity of the episode. The only factor which can be mentioned is the level of RMYBW before SARA. Even if the differences in RMYBW between the 3 groups were not significant, high milk producers presented a larger drop in DMIBW and a higher initial pulse value than low milk producers.

The daily kinetic of rumen pH during spontaneous bouts of SARA presented a sudden drop at d 0, followed by a very quick recovery within a day, and thereafter a clear rebound with fairly high values of pH (more than 6.5). In contrast, experimentally induced SARA with high quantities of rapidly fermentable carbohydrates (more than 12 g / kg BW) induced pH kinetics exhibiting no rebound above 6.5 and needing generally more than 100 h to progressively return to initial values (Patra et al., 1996, Mohamed Nour et al., 1999, Brown et al., 2000). This large difference in the pattern of pH recovery suggests that induced SARA is not representative of spontaneous SARA. The present pattern of rumen pH with a rebound above 6.5 was surprisingly rarely described in the literature. It was shown only for 1 single growing animal (Schwartzkopf-Genswein et al., 2003) and 2 adult sheep (Kezar and Church, 1979) but it was never described in lactating animals. At least 2 basic homeostatic mechanisms seem to be involved in this pH rebound and recovery. There was first a decrease in DMIBW and thus in the supply of fermentable matter to the rumen micro-organisms. The positive relationship between DMIBW and VFA concentration on PC1 strengthens this assumption. This decrease could also be explained by a decrease in microbial digestion activity which has already been observed during SARA (see review by Martin et al., 2006). Secondly, there was an increase in the IM, and thus in the buffer recycled per DMI. This was the consequence of a relatively low decrease in daily chewing duration compared to the drop in DMIBW. Individual variations in the IM are known to be negatively correlated with rumen

pH (Giger-Reverdin et al., 2004). The clear rebound in rumen pH was probably the outcome of at least these 2 adaptations and allowed the animal to counteract the effect of acidosis.

It is usually assumed that DMI starts to be significantly depressed when rumen pH reaches 5.5 (Fulton et al., 1979, Oetzel, 2003). However, several assumptions have been made to explain the relationship between rumen pH and DMI, for example a decrease in the frequency and amplitude of ruminal contractions inducing a relative increase in rumen load (Braun et al., 1992, Oetzel, 2000), an increase in rumen lactic acid (Buéno, 1975) and in osmotic pressure (Oetzel, 2003, Martin et al., 2006), an inflammation of the ruminal epithelium (Oetzel, 2003), a metabolic dehydration (see review by Krause and Oetzel, 2006), a drop in blood bicarbonate reserve (Krehbiel et al., 1995), or more generally an alteration in the metabolic acid base status (Braun et al., 1992, Peyraud and Apper-Bossard, 2006). The present data confirmed the link between the acid base status and DMI as stressed by the position of ELB and DMIBW on the first component of the PCA. Milk yield is well known to be strongly linked with DMI and the milk yield drop pattern, followed by a progressive recovery phase during an episode of SARA, has been already described (Krause and Oetzel, 2005).

The global delay of the whole episode of SARA is basically controlled by the kinetic of the INIT compartment which presents a mean residence time (inverse of fractional outflow rate) of 167 h (group pH). Other structural delays are related to the mean residence time of matter in mixing compartments DistpH (13.5 h), DistDMI (13.2 h) and DistRMY (16.4 h). The linear delay (22.3 h for group pH) which had to be added between the DistDMI and DistRMY compartments could be the outcome of a transient stored energy utilization (see further). By doing this the whole system globally presents a mean residence time of around 9 d. The delay between pH, DMI and RMY drops was only evoked in a few papers after induced SARA. Between pH and DMI, the delay was around 4 to 12 h in sheep (Kezar and Church, 1979, Patra et al., 1996) and around 1 to 2 d in 1 growing beef after 2 consecutive days of low rumen pH (Schwartzkopf-Genswein et al., 2003). Concerning milk yield, only Agenas et al. (2003) described a decrease in milk yield 24 h after an induced feed deprivation. Some of the episodes in group 3 almost led to no intake during a few days, which might be compared to feed deprivation. However, as far as we are aware, these delays were not precisely described and modeled until now. The delayed drop in RMYBW, after the DMIBW one, suggests a homeostatic adaptation to the shortage in available energy into the organism. The fact that the drop in energy balance was approximatively synchronized with those of DMIBW and RMYBW is consistent with this assumption. Therefore, it can be assumed that DMIBW is the driving force in the drop in RMYBW in the first phase of an episode of SARA.

In the present experiment, pH, DMIBW and RMYBW needed around 10, 18 and more than 25 d, respectively, to recover the pre pre-period values. In contrast, in the experiment of Kezar and Church (1979), sheep needed between 48 to 96 h to reach an intake similar to the one they had before acidosis induction. Brossard et al. (2003b) also observed a reduced DMI during only the first 2 to 3 d after a diet change in feed restricted sheep. This is a lot less than what was observed in our experiment, but our results could be a specificity of dairy animals. The slow rate of recovery of DMIBW and RMYBW compared to the rumen pH one raises a major issue. It is not clear if either DMIBW, RMYBW or another parameter, is the driving force of the recovery phase. The energy balance was recovered more rapidly (4 d) than DMIBW and RMYBW. In contrast, the cumulated energy balance was continuously decreasing during SARA episodes and thus achieved a large deficit. Apparently, this deficit seemed to be unable to induce a compensatory increase in DMIBW. Thus, homeostatic regulation of DMI seemed to have been overloaded by another mechanism. An aversion of the animal towards its diets is an assumption which is strengthened by the decrease in intake rate observed in the goats presenting the lowest level of DMIBW. This aversion could also explain why the minimum values observed for DMIBW and RMYBW were systematically lower than the simulated ones. The apparent memory of the animals showing a second episode of SARA always much more limited than the first one is consistent with this hypothesis. However, all these aspects would need confirmation through a specific experimental design.

It is well documented that high concentrate diets induce low milk fat content (see review by Peyraud and Apper-Bossard, 2006). However, during a SARA episode, the milk fat content was significantly higher after the initial drop in rumen pH than during the pre-period. The higher milk fat content and the differences in the slopes of milk fat and protein contents are likely the outcome of lipomobilization. There is actually a period intense lipomobilization during the SARA bouts which is confirmed by our results and those of (Brown et al., 2000) on plasma NEFA. Generally, as dietary NDF or concentrate is modified, the variation in milk fat content is opposite to those of milk protein and lactose contents (Sauvant, 1999). This was not the case during SARA bouts where milk fat and protein contents responses were opposite to the lactose one. These data suggest that the lactose secretion is largely depressed, as a consequence of the rapid shortage in propionate coming from the rumen and the limited possibility for endogenous gluconeogenesis in lactating ruminants. The present data on rumen VFA and acetate to propionate ratio are consistent with this assumption. As lactose secretion constitutes the major driving force of milk water secretion, its drop induces the drop in RMY, which induces a concentration of milk components and therefore an increase in milk fat and

protein contents. Such a phenomenon of milk concentration has already been observed in experimentally starved lactating cows (Drackley et al., 1992).

CONCLUSION

Subacute rumen acidosis is an important determinant of ruminant productivity. A systematic study of individual spontaneous episodes of SARA provided a precise description of their kinetics and allowed to model them. The kinetic of a SARA bout was characterized by a rapid alteration of pH followed by waves of DMI and RMY disturbances and a progressive recovery phase. SARA episodes lasted around 20 d. Today, many mechanisms of bouts of acidosis induction and recovery remain unknown and this model represents a first step in building a mechanistic model of SARA episodes in ruminants fed high concentrate diets. The current results illustrate the limit between physiology and pathology and the role of homeostatic processes in saving the animal life as it seems that animals might possess some nutritional wisdom. It can be assumed that death could happen when compensatory mechanisms, mainly a drop in DMI, cannot occur quickly enough because of the delay which is shown in the current work, or when the aversion towards the diet remains more important than hunger during too many days.

APPLICATIONS

Considering the fairly long duration of the SARA episodes described in this paper (almost 20 d) and the frequency of this disease, it seems opportune to evaluate the influence of diets rich in concentrate, not only on mean values of chewing activities and milk production, but also on the occurrence and severity of SARA bouts. It seems also obvious from these results that the occurrence of bouts of acidosis has to be analyzed in all the experiments involving high concentrate diets or high producing animals, because whatever the parameter tested, the effects of using high concentrate diets can be confounded with the acidosis effect.

ANNEX 1: Description of the model parameters**Initial compartment: INIT**

$$dINIT/dt = \text{Pulse (pulse, tpulse)} - \text{Finph}$$

$$\text{Finph} = \text{kinph} \times \text{INIT}$$

kinph: fractional outflow rate from INIT to DistPH

pulse: initial pulse of dimensionless matter

Compartment disturbance of pH: DistPH

$$d\text{DistPH}/dt = -\text{Fphdmi} + \text{Finph}$$

$$\text{Fphdmi} = \text{kphdmi} \times \text{DistPH}$$

kphdmi: fractional outflow rate from DistPH to DistDMI

Compartment disturbance of dry matter intake: DistDMI

$$d\text{DistDMI}/dt = +\text{Fphdmi} - \text{Fdmirmy}$$

$$\text{Fdmirmy} = \text{kdmirmy} \times \text{DistDMI}$$

kdmirmy: fractional outflow rate from DistDMI to DistRMY

Compartment disturbance of raw milk yield: DistRMY

$$d\text{DistRMY}/dt = -\text{Frmyout} + \text{DELDMI}$$

$$\text{Frmyout} = \text{krmyout} \times \text{DistRMY}$$

krmyout: fractional outflow rate from DistRMY to OutRMY

DELDMI: delay of duration deldmi applied to Fdmirmy

Compartment of RMY accumulation: OutRMY

$$d\text{outRMY}/dt = +\text{Frmyout}$$

Variable pH

$$\text{pH} = \text{pH0} - (\text{aph} \times \text{DistPH}) + (\text{aimast} \times (\text{DMIBW0} - \text{DMIBW}))$$

aph: size parameter between DistPH and actual pH value

aimast: parameter representing Index of mastication variations

Variable DMIBW (Dry matter intake, g/kg BW)

$$\text{DMIBW} = \text{DMIBW0} - (\text{admi} \times \text{DistDMI})$$

admi: size parameter between *DistDMI* and actual *DMIBW* value (set to 1.00)

DMIBW0: initial mean value of *DMIBW*

Variable: RMYBW (Raw milk yield, g/kg BW)

$RMYBW = RMYBW0 - army \times DistRMY$

army: size parameter between *DistRMY* and actual *RMYBW* value

RMYBW0: initial mean value of *RMYBW*

Variable: EBBW (energy balance kcal/kgBW)

$EBBW = admieb \times DMIBW - armyeb \times RMYBW$

admieb: size parameter between *DMIBW* and energy input value

armyeb: size parameter between *RMYBW* and energy requirements value

REFERENCES

- Agenas, S., K. Dahlborn, and K. Holtenius. 2003. Changes in metabolism and milk production during and after feed deprivation in primiparous cows selected for different milk fat content. *Livest. Prod. Sci.* 83: 153-164.
- Baumont, R., J. P. Dulphy, D. Sauvant, G. Tran, F. Meschy, J. Aufrère, J. L. Peyraud, and P. Champciaux. 2007. Les tables de la valeur des aliments. Pages 181-286 in *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux-Valeurs des aliments. Tables INRA 2007*. Quae ed.
- Braun, U., T. Rihs, and U. Schefer. 1992. Ruminal lactic acidosis in sheep and goats. *Vet. Rec.* 130: 343-349.
- Brossard, L., M. Fabre, C. Martin, and B. Michalet-Doreau. 2003a. Validation of continuous ruminal pH measurements by indwelling probes (poster). Page 25 in *Conference of Gastrointestinal Function, Chicago*.
- Brossard, L., C. Martin, and B. Michalet-Doreau. 2003b. Ruminal fermentative parameters and blood acido-basic balance changes during the onset and recovery of induced latent acidosis in sheep. *Anim. Res.* 52: 513-530.
- Brown, M. S., C. R. Krehbiel, M. L. Galyean, M. D. Remmenga, J. P. Peters, B. Hibbard, J. Robinson, and W. M. Moseley. 2000. Evaluation of models of acute and subacute acidosis on dry matter intake, ruminal fermentation, blood chemistry, and endocrine profiles of beef steers. *J. Anim. Sci.* 78: 3155-3168.
- Brun, J. P., S. Prache, and G. Béchet. 1984. A portable device for eating behaviour studies. Page 1-8 in *5th european grazing workshop, Edimbourg, UK*.

- Buéno, L. 1975. Rôle de l'acide DL-lactique dans le contrôle de l'ingestion alimentaire chez le mouton. *Ann. Rech. Vet.* 6: 325-335.
- Cao, G. R., P. B. English, L. J. Filippich, and S. Inglis. 1987. Experimentally induced lactic acidosis in the goat. *Aust. Vet. J.* 64: 367-370.
- Drackley, J. K., M. J. Richard, D. C. Beitz, and J. W. Young. 1992. Metabolic changes in dairy cows with ketonemia in response to feed restriction and dietary 1,3-butanediol. *J. Dairy Sci.* 75: 1622-1634.
- Dragomir, C., D. Sauvant, B. Michalet Doreau, J. L. Peyraud, and S. Giger-Reverdin. 2008. Meta-Analysis of 0-8 Hours post-prandial kinetics of ruminal pH. *Animal.* 2: 1437-1448.
- Fulton, W. R., T. J. Klopfenstein, and R. A. Britton. 1979. Adaptation to high concentrate diets by beef cattle. 2. Effect of ruminal pH alteration on rumen fermentation and voluntary intake of wheat diets. *J. Anim. Sci.* 49: 785-789.
- Giger-Reverdin, S., C. Duvaux-Ponter, D. Sauvant, O. Martin, I. Nunes do Prado, and R. Müller. 2002. Intrinsic buffering capacity of feedstuffs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 96: 83-102.
- Giger-Reverdin, S., D. Sauvant, J. Tessier, G. Bertin, and P. Morand-Fehr. 2004. Effect of live yeast culture supplementation on rumen fermentation in lactating dairy goats. *S. Afri. J. Anim. Sci.* 34 (Suppl. 1): 59-61.
- Keunen, J. E., J. C. Plaizier, I. Kyriazakis, T. F. Duffield, T. M. Widowski, M. I. Lindinger, and B. W. McBride. 2002. Effects of a subacute ruminal acidosis model on the diet selection of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85: 3304-3313.
- Kezar, W. W. and D. C. Church. 1979. Ruminal changes during the onset and recovery of induced lactic acidosis in sheep. *J. Anim. Sci.* 49: 1161-1167.
- Krause, K. M. and G. R. Oetzel. 2005. Inducing subacute ruminal acidosis in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 88: 3633-3639.
- Krause, K. M. and G. R. Oetzel. 2006. Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126: 215-236.
- Krehbiel, C. R., R. A. Britton, D. L. Harmon, T. J. Wester, and R. A. Stock. 1995. The effects of ruminal acidosis on volatile fatty acid absorption and plasma activities of pancreatic enzymes in lambs. *J. Anim. Sci.* 73: 3111-3121.
- Lescoat, P., A. Danfaer, and D. Sauvant. 1996. Discussion of methods in building and validating a model: example of amino acid metabolism in ruminants. *Ann. Zootech.* 45 (Suppl.): 237-255.
- Martin, C., L. Brossard, and M. Doreau. 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *Prod. Anim.* 19: 93-108.
- Mertens, D. R. 1996. Methods in modelling feeding behaviour and intake in herbivores. *Ann.*

- Zootech. 45 (Suppl.): 153-164.
- Mohamed Nour, M. S., M. T. Abusamra, and B. E. D. Hago. 1999. Experimentally induced lactic acidosis in Nubian goats: clinical, biochemical and pathological investigations. *Small Rumin. Res.* 31: 7-17.
- Nocek, J. E. 1997. Bovine acidosis: implications on laminitis. *J. Dairy Sci.* 80: 1005-1028.
- Oetzel, G. R. 2000. Clinical aspects of ruminal acidosis in dairy cattle. Page 14 pages in 33rd Annual Conference, American Association of Bovine Practitioners, Rapid City, South Dakota, Usa.
- Oetzel, G. R. 2003. Introduction to ruminal acidosis in dairy cattle. Page 11 pages in Preconvention Seminar 7: Dairy Herd Problem Investigation Strategies. American Association of bovine practitioners. 36th annual conference, Columbus, Ohio, USA.
- Patra, R. C., S. B. Lal, and D. Swarup. 1996. Biochemical profile of rumen liquor, blood and urine in experimental acidosis in sheep. *Small Rumin. Res.* 19: 177-180.
- Peyraud, J. L. and E. Apper-Bossard. 2006. L'acidose latente chez la vache laitière. *Prod. Anim.* 19: 79-92.
- Sauvant, D. 1999. Le concept des lois de réponses multiples aux régimes, trait d'union entre les domaines techniques et économiques de l'élevage. Page 11-17 in 6èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris.
- Sauvant, D., F. Meschy, and D. Mertens. 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *Prod. Anim.* 12: 49-60.
- Sauvant, D. 2000. Granulométrie des rations et nutrition du ruminant. *Prod. Anim.* 13: 99-108.
- Sauvant, D., S. Giger-Reverdin, and F. Meschy. 2006. Le contrôle de l'acidose ruminale latente. *Prod. Anim.* 19: 69-78.
- Schwartzkopf-Genswein, K. S., K. A. Beauchemin, D. J. Gibb, D. H. Crews, D. D. Hickman, M. Streeter, and T. A. McAllister. 2003. Effect of bunk management on feeding behavior, ruminal acidosis and performance of feedlot cattle: a review. *J. Anim. Sci.* 81 (E, Suppl. 2): E149-E158.
- Tremere, A. W., W. G. Merrill, and J. K. Loosli. 1968. Adaptation to high concentrate feeding as related to acidosis and digestive disturbances in dairy heifers. *J. Dairy Sci.* 51: 1065-1072.
- Uhart, B. A. and F. D. Carroll. 1967. Acidosis in beef steers. *J. Anim. Sci.* 26: 1195-1198.

2. Variabilité intra- et inter-jours du comportement alimentaire de chèvres laitières en cases individuelles

La répartition naturelle des activités d'ingestion et de rumination des ruminants au cours du nyctémère est relativement stable au pâturage. En revanche, en stabulation, elle peut être variable selon les individus et influencée par le régime.

Objectifs

→ Analyser la variabilité intra-jour du comportement alimentaire, et caractériser les différents types de comportements existants chez des chèvres en case individuelle recevant une ration complète en deux distributions journalières.

→ Déterminer la variabilité inter-jours du comportement alimentaire liée à l'individu, au régime ou à l'occurrence d'épisodes d'acidose.

Matériels et méthodes

Douze chèvres en milieu de lactation ont successivement reçu deux régimes plus ou moins riches en concentré (L : 20 % et H : 50 %). Tous les animaux ont d'abord reçu le régime L pendant 2 semaines, puis le régime H pendant 11 semaines, puis à nouveau le régime L pendant 3 semaines. La ration était distribuée deux fois par jour, dans les proportions d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi, conformément à l'intervalle de temps entre les traites. Les crises d'acidose ont été codées en utilisant les chutes journalières successives d'au moins deux des paramètres : pH, ingestion et production laitière.

Le pH ruminal a été mesuré toutes les minutes par une sonde de pH intra-ruminale et l'ingestion toutes les 2 min grâce à des balances situées sous les bacs d'alimentation. L'activité masticatoire a été enregistrée par des APECs, permettant d'obtenir toutes les 2 min les temps d'ingestion, de rumination ou de repos masticatoire. Ces données ont permis de calculer, pour les 46 intervalles de 20 min entre la distribution du soir et celle du matin, les quantités ingérées, les durées d'ingestion et de rumination et le pH moyen ruminal. Deux ACP ont été réalisées : la première sur les durées d'ingestion et de rumination, la seconde sur les

quatre paramètres (ingestion, pH, durées d'ingestion et de rumination) afin de dégager les formes fortes de comportements et les cinétiques de pH associées.

Résultats

La première ACP a montré que les éléments majeurs de la diversité intra-jour du comportement alimentaire étaient d'une part l'existence, ou l'absence, d'un premier repas en deux phases, d'autre part une activité de rumination nocturne importante et croissante.

Les animaux qui ont présenté des périodes d'ingestion et de rumination bien individualisées, et une grande période de rumination nocturne, ont présenté un indice de mastication plus important et une chute de pH postprandiale plus marquée après la distribution que les animaux qui ont ingéré et ruminé régulièrement et alternativement.

Ces observations ont été confirmées par la seconde ACP.

La variabilité inter-jours du comportement alimentaire a été très variable selon les animaux, certains présentant un comportement très stable tandis que d'autres présentaient un comportement variable ou qui a évolué au cours de l'expérience.

Le comportement alimentaire peut aussi dépendre du pourcentage de concentré du régime et de la présence ou non de crises d'acidose. En particulier, les crises d'acidose peuvent entraîner une déstructuration de l'organisation de l'ingestion en repas bien différenciés.

Discussion et conclusion

- Cette méthode d'analyse multivariée a permis de mettre en évidence deux types de comportement alimentaire très différents, cependant observés de manière non négligeable et non accidentelle.

- A quantités ingérées et pH moyen ruminal similaires, les animaux peuvent présenter des cinétiques d'ingestion, de rumination et de pH ruminal très différentes.

- Le principal facteur de variation du comportement alimentaire semble être individuel. Les comportements sont généralement répétables d'un jour à l'autre pour un même individu, mais ils peuvent également évoluer au cours du temps, à la suite de modifications de la composition du régime ou de perturbations ruminales de type acidose.

- Aucune influence de la variabilité inter-individus du comportement alimentaire n'a pu être mise en évidence sur la susceptibilité des animaux à l'acidose, malgré les différences de cinétiques de pH induites par les variations du comportement alimentaire.

**Variabilité intra- et inter-jours du comportement alimentaire de chèvres
laitières en cases individuelles**

Desnoyers M, Sauvant D., Giger-Reverdin S. and Duvaux-Ponter. C.

*UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude
Bernard 75005 Paris, France*

Introduction

Chez les ruminants, la répartition des activités d'ingestion et de rumination au cours du nyctémère semble être stable d'un jour à l'autre. L'ingestion est généralement diurne : au pâturage, les ruminants réalisent naturellement deux repas principaux, l'un après l'aube et l'autre avant le coucher du soleil, séparés par des périodes d'ingestion intermédiaires (Dulphy et Faverdin, 1987). En stabulation, les ruminants alimentés à volonté effectuent également le plus grand nombre de repas en période diurne, avec deux pics, l'un en début et l'autre en fin de journée (Dulphy et Faverdin, 1987). La rumination est dominée par l'ingestion dans la mesure où une période de rumination ne vient jamais interrompre un repas alors qu'elle peut être arrêtée par le déclenchement d'un repas (Jarrige *et al.*, 1995). Dans le cadre d'une seule distribution par jour à des vaches laitières, Heinrichs et Conrad (1987) ont constaté une ingestion maximale au cours des trois heures suivant la distribution et un minimum atteint au bout de 14 h (ce qui correspond à la nuit pour une distribution matinale). Dans le cadre de deux distributions journalières d'une ration mixte, les chèvres réalisent un repas principal après chaque distribution, les deux repas principaux étant séparés par des repas secondaires intermédiaires (Abijaoudé, 1999).

La phase de rumination nocturne existe chez tous les ruminants domestiques, quelles que soient leurs conditions d'alimentation (Focant, 1984). L'augmentation de la proportion de concentré de 45 à 70 %, dans le régime de chèvres en cases individuelles, entraîne une diminution à la fois de la durée des repas principaux et de la proportion d'aliments ingérés au cours des repas principaux (de 68 à 60 %), et donc une augmentation de la proportion d'aliments ingérés au cours des repas secondaires, ainsi que du nombre de repas (Abijaoudé *et al.*, 2000a ; 2000b). Ceci met en évidence une certaine déstructuration de l'organisation des repas lorsque l'apport en concentré augmente. Pour des animaux nourris deux fois par jour, la rumination a principalement lieu la nuit, puis en tout début de matinée, et en début d'après midi (Beauchemin *et al.*, 1990 ; Deswysen *et al.*, 1993 ; Fischer *et al.*, 2002). L'augmentation du pourcentage de concentré de 20 à 80 % dans la ration de petits ruminants a entraîné une diminution presque totale de la rumination pendant la phase éclairée du nyctémère, mais peu de modifications pendant la phase nocturne (Focant, 1984). Dans cette même étude, la diminution de la durée de rumination a été due à la diminution du nombre de périodes de rumination, mais la durée moyenne des périodes de rumination n'a pas été influencée. La répartition des activités d'ingestion et de rumination au cours de la journée peut donc être influencée par la composition du régime.

Dulphy *et al.* (1990) ont observé plus de différences de comportement alimentaire entre individus d'une même espèce, qu'entre espèces différentes. Cette variabilité individuelle semble plus importante chez les petits ruminants que chez les vaches (Dulphy *et al.*, 1990). Cependant, des vaches laitières de même poids vif et de même production ingérant en quantité identique une ration très ingestible offerte à volonté peuvent présenter une dynamique de la prise alimentaire très différente (Jarrige *et al.*, 1995). Par exemple, trois vaches ingérant avec des vitesses moyennes quotidiennes très voisines présentent des vitesses d'ingestion instantanées qui varient du simple au double en début de repas (Jarrige *et al.*, 1995).

Le comportement alimentaire moyen varie donc en fonction du régime, mais aussi de l'individu. Pour mieux comprendre ces variations, en particulier dans un contexte d'étude de l'acidose, il est important de segmenter finement l'échelle de temps. Le premier objectif de cette étude était d'analyser la variabilité intra-jour du comportement alimentaire et de caractériser les différents types de comportement existants chez des chèvres en case individuelle recevant leur ration complète en deux distributions journalières. Le second objectif était de déterminer la variabilité inter-jours du comportement alimentaire liée à l'individu, au régime ou à l'occurrence d'épisodes d'acidose.

Matériels et méthodes

Animaux et installations

Douze chèvres laitières (4 Saanen et 8 Alpines) en milieu de lactation ($40 \pm 4,0$ jours de lactation en début d'expérience), pesant $65 \pm 7,4$ kg de poids vif, produisant $3,5 \pm 0,78$ kg au début de l'expérience, canulées du rumen et n'ayant jamais participé à une expérimentation sur l'acidose ont été utilisées. Les chèvres ont été placées en cases individuelles de 2 m x 1 m sur caillebotis pendant toute la durée de l'expérience. Ces cases possédaient un abreuvoir pour deux cases, et étaient séparées par des parois pleines jusqu'à environ 1 m du sol, et par des grillages au-dessus de 1 m, afin d'éviter que les chèvres ne s'endommagent mutuellement les appareils de mesure. L'expérimentation a débuté après deux semaines d'habituation au dispositif expérimental. La nourriture était distribuée individuellement sous forme de ration complète deux fois par jour, après chaque traite, dans des proportions d'un tiers le matin (8 h) et deux tiers l'après midi (16 h), conformément à l'intervalle entre les traites. Les animaux étaient alimentés *ad libitum* et les quantités distribuées étaient adaptées à chaque animal et réajustées chaque semaine afin d'atteindre environ 10 % de refus chaque jour. La composition des régimes est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Composition et analyse des deux régimes expérimentaux contenant un faible (L, 20 %) ou fort (H, 50 %) pourcentage de concentré.

Régime	L	H
<i>Composition (% MS) :</i>		
Concentré ^a	20	50
Foin de luzerne déshydraté	32	0
Foin de prairie	19	35
Pulpe de betterave	29	15
Matière sèche (%)	54,8	63
Energie nette UFL /kg MS	0,77	0,91
PDIN g/kg MS	85	95
PDIE g/kg MS	96	103
<i>Analyse (% MS)</i>		
NDF	39,9	34,7
ADF	21,4	15,9
ADL	4,0	1,8

^a25 % blé, 25 % orge, 30 % maïs, 15 % tourteau de soja, 3 % complément minéral et vitaminé et 2 % de mélasse.

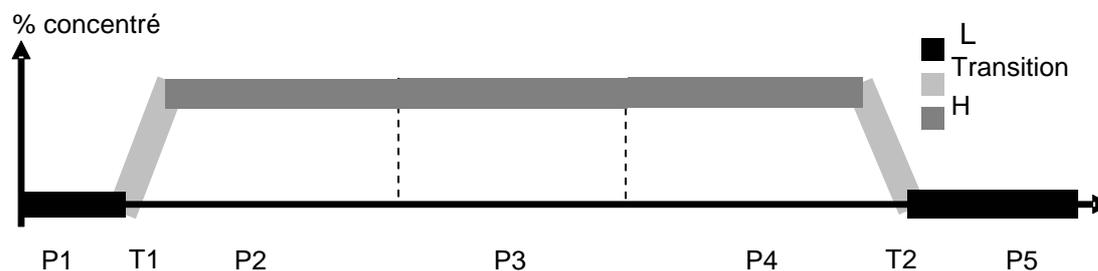


Figure 1. Description du dispositif expérimental et dénomination des différentes périodes suivies par 12 chèvres recevant un régime à fort (50 %, H) ou faible (20 %, L) pourcentage de concentré. P1 a duré 2 semaines, P2, P4 et P5 ont duré 3 semaines, P3 a duré 5 semaines et les transitions (T1 et T2) ont duré 1 semaine.

Le dispositif expérimental est décrit dans la Figure 1. Les animaux ont tout d'abord reçu un régime à faible pourcentage de concentré (**L**, 20 %) pendant l'habitué aux cases individuelles (**P1**). Ils ont ensuite reçu un régime acidogène riche en concentré (**H**, 50 %) pendant 11 semaines, puis à nouveau le régime L pendant trois semaines. La période de distribution du régime acidogène a été découpée en trois sous-périodes pour l'analyse : **P2** (3 semaines), **P3** (5 semaines), et **P4** (3 semaines). Les transitions entre les régimes ont duré une semaine à chaque fois et sont notées T1 et T2. Les animaux disposaient d'une pierre à lécher pendant toute l'expérience.

Ingestion, poids vif et production

Les animaux étaient pesés chaque semaine. Les quantités distribuées et les refus étaient pesés chaque jour avant le repas du soir afin de calculer la matière sèche ingérée quotidienne, ajustée par kg de poids vif, le pourcentage de matière sèche de la ration étant mesuré chaque semaine. La production laitière était enregistrée cinq jours par semaine.

Détection des crises d'acidose

Les crises d'acidose ont été essentiellement déterminées par les variations journalières d'ingestion et de production laitière. Premièrement, pour chaque chèvre, les jours présentant une quantité ingérée ou une production laitière inférieure à moyenne – 1,5 * écart-type (calculés pour chaque chèvre et chaque période) ont été repérés. Deuxièmement, les jours présentant une chute d'ingestion supérieure à 10 g / kg PV ont également été repérés. Troisièmement, les jours présentant un pH moyen ruminal inférieur à 6,0 ont également été repérés. Finalement, une chèvre a été déclarée en crise d'acidose si au moins deux des paramètres parmi le pH, l'ingestion et la production étaient repérés simultanément ou successivement pendant au moins deux jours consécutifs. La fin de la crise était déterminée par la fin des jours repérés. Les jours représentant les crises d'acidose sont codés « 1 », les autres jours sont codés « 0 ».

Mesures en continu

Les chèvres ont été équipées, une semaine avant le début des mesures

- d'un licol en cuir (spécifique pour chèvres) individuellement ajusté à chaque animal
- d'une couverture en tissu conçue et réalisée pour cette expérience. Cette couverture couvrait le dos et les flancs de l'animal, possédait deux poches sur le dos de l'animal, et était maintenue par des sangles élastiques réglées de manière à ne pas gêner, ni blesser l'animal.

Cinétiques d'ingestion. Les cinétiques d'ingestion étaient mesurées simultanément sur les 12 chèvres, par 12 balances individuelles (Baléa, France), reliées à un ordinateur enregistrant toutes les deux minutes le poids des bacs d'alimentation grâce à un logiciel spécialement conçu par Baléa (France). Ces balances n'étaient ni visibles, ni accessibles aux animaux, car situées sous les bacs d'alimentation. Ces données ont permis de calculer pour chaque intervalle de deux minutes la quantité de MSI par kg de poids vif (MSIPV), grâce aux mesures hebdomadaires de la matière sèche de la ration et du poids vif des animaux.

Activité masticatoire. Les durées d'ingestion et de rumination étaient mesurées quotidiennement à l'aide d'un Appareil Portatif pour l'Etude du Comportement (APEC) (chapitre 2.2), développé à l'INRA de Theix (Brun et al., 1984) et adapté aux chèvres pour notre expérience. Il s'agit d'appareils autonomes et individuels qui, pour chaque période de 2,5 s écoulée, détectent s'il y a eu activité ou inactivité masticatoire. Le nombre total de périodes d'activité ou d'inactivité consécutives est alors comptabilisé et enregistré. Le dispositif était constitué d'un capteur fixé au licol sous la mâchoire inférieure de l'animal, d'un boîtier situé dans la couverture et d'un tuyau conducteur reliant ces deux éléments. Les données étaient stockées dans le boîtier et déchargées quotidiennement sur un ordinateur. Ces données ont ensuite été analysées par un logiciel spécifique écrit par l'INRA de Theix (Béchet et al., 1995) qui permet de classifier les mouvements de mâchoire en ingestion, rumination ou repos masticatoire. Ce logiciel a été modifié pour notre expérience afin de calculer la durée d'ingestion, de rumination et d'inactivité masticatoire par intervalles de deux minutes au lieu d'une heure.

pH ruminal. Le pH ruminal était mesuré toutes les minutes par une sonde positionnée dans le rumen et reliée à un boîtier enregistreur (EasyLog EL-2, Omega engineering. Inc, USA) situé dans une poche de la couverture. La sonde (Fisher Bioblock Scientific, France) avait une précision de 0,01 unité pH. Les couples sonde-boîtier ont été étalonnés (solutions tampon pH 4,01 et 6,87) grâce à un logiciel (El-Win, EasyLog, Lascar Electronics Ltd., USA) chargé sur un ordinateur et reliable au boîtier. Chaque sonde de pH était fixée à une tige de téflon munie d'un lest de 300 g afin de réduire sa mobilité dans le rumen (selon la méthode décrite par Brossard *et al.*, 2003). Chaque sonde était sortie du rumen deux à trois fois par semaine (quelques minutes) afin de vérifier son bon état, la fixation de la tige à la sonde et la présence du lest. Les boîtiers étaient déchargés sur un ordinateur portable tous les deux ou trois jours (la sonde restant dans le rumen), grâce au logiciel El-Win.

Traitement des données. Les données issues de ces trois types d'appareils ont été regroupées, pour chaque chèvre, dans un fichier global (Microsoft Excel). Ce fichier récapitule pour chaque minute la valeur du pH ruminal, la quantité de MSIPV, et les durées d'ingestion, de rumination et de repos masticatoire lorsque ces données étaient disponibles, ainsi que les heures de distribution des repas.

Analyse

Le pH ruminal a été moyenné par intervalles de 20 min. Les quantités ingérées et les durées d'ingestion et de mastication ont été sommées par intervalles de 20 min pour obtenir le temps total ou la quantité totale ingérée pendant les 20 min considérées. Ces intervalles ont été calés par rapport à la distribution d'aliment du soir, c'est-à-dire que le premier intervalle de 20 min débute par la distribution du soir. Seule l'analyse entre la distribution du soir et celle du matin (15 h) est présentée car les deux tiers de la ration sont distribués le soir, et parce que cet intervalle comprend la nuit. Une analyse sur la journée complète serait, de plus, moins fiable car la distribution du matin n'avait pas toujours lieu exactement 16 h après celle du soir, et la distribution du matin se retrouvait donc dans différents intervalles selon les jours. Des résultats similaires, et de moindre ampleur que ceux obtenus sur la distribution du soir, ont été observés lorsque la distribution du matin était analysée séparément, ce qui est cohérent avec les quantités relatives apportées à chaque distribution.

Une première analyse en composantes principales (**ACP-A**) a été réalisée en utilisant uniquement les durées d'ingestion (**Ding**) et de rumination (**Drum**), ce qui correspond à 442 « animaux-jours » (**AJ** : 1 animal, 1 jour donné). Les 10 % d'AJ extrêmes sur chacun des deux premiers axes ont été repérés et analysés séparément, afin de déterminer des formes fortes de comportement. Le choix d'utiliser 10 % d'AJ extrêmes est arbitraire et l'utilisation d'une proportion différente aurait pu modifier les résultats, sans altérer les principales conclusions. Ces groupes extrêmes ont été nommés, tout au long du texte, par rapport à leur position aux extrémités positives ou négatives des axes de l'ACP, mais les signes des coordonnées sur les axes d'une ACP n'ont aucune signification biologique. Cette notation a donc essentiellement été utilisée pour une raison de clarté. De même, la description des figures utilise les notions de parties positives et négatives de l'axe, même si le signe n'a pas de signification *per se*. Au sein de ces deux groupes d'extrêmes, les AJ présentant également des données de pH et de quantités ingérées sur les intervalles considérés ont été isolés afin de déterminer si les formes fortes de comportement alimentaire sont associées à des formes

fortes de pH, et si les deux groupes d'extrêmes correspondent à des quantités totales ingérées ou des pH ruminiaux moyens similaires.

Une seconde ACP (**ACP-B**) a ensuite été réalisée uniquement pendant la période de distribution du régime acidogène (P2, P3 et P4), et uniquement pour les AJ non codés en acidose. Elle a été effectuée simultanément sur le pH ruminal, la MSIPV et les durées d'ingestion et de rumination. En raison de problèmes techniques concernant les sondes de pH et les APECS, 72 AJ ont été utilisés. Les 10 % d'AJ extrêmes sur chacun des deux premiers axes ont été repérés, et analysés séparément, comme pour la première ACP, afin de déterminer des formes fortes de comportement et de pH ruminal.

Analyse statistique

Seules les données mesurées pendant la deuxième semaine de la période P1 ont été analysées, la première semaine correspondant à l'habituement aux cases individuelles.

Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant la procédure "modèle linéaire généralisé" (Minitab, version 12.2, 1995, Minitab Inc.)

L'analyse de l'effet du régime et de l'acidose a été effectuée selon le modèle suivant :

$$Y_{ij} = a_i + T + A + D + e_{ij}$$

Où a_i représente l'effet fixe de la chèvre i , T la covariable temps (en jours), A la covariable acidose (0 = jour sans crise et 1 = jour codés en crise) et D la covariable régime (0 = L et 1 = H). E_{ij} représente l'erreur résiduelle.

L'analyse de l'effet du groupe d'AJ extrême a été réalisée selon le modèle suivant :

$$Y_{ij} = T + A + C_i + e_{ij}$$

Où T représente la covariable temps (en jours), A la covariable acidose (0 = jour sans crise et 1 = jour en crise) et C_i l'effet fixe du groupe d'AJ extrêmes (« - » ou « + »). E_{ij} représente l'erreur résiduelle.

Résultats et discussion

Une chèvre est morte en tout début de période P4. Les données de cette chèvre ont cependant été conservées jusqu'à l'avant-veille de sa mort, car aucune modification de son comportement alimentaire, de son ingestion ou de son pH ruminal n'a été observée.

ACP-A durées d'ingestion et de rumination

Les valeurs moyennes et les erreurs standard des 442 AJ utilisés pour chacun des 46 intervalles de 20 min de la distribution du soir à celle du matin (Figure 2) montrent qu'en moyenne, les chèvres ont réalisé un repas principal initial, suivi d'une courte phase de rumination, puis un second repas, en rebond du premier. Les animaux ont ensuite ruminé de plus en plus et ingéré de moins en moins pendant la nuit (intervalle 12 à 41 environ). Ceci s'est fait au détriment du temps de repos masticatoire (non présenté sur la Figure 2), car l'augmentation de la durée de rumination est supérieure à la diminution de la durée d'ingestion. Les chèvres se sont ensuite remises à ingérer juste avant la traite du matin, vraisemblablement en relation avec le lever du jour et une reprise d'activité dans la chevrerie.

La Figure 3 présente la projection des variables (durées d'ingestion et de rumination sur des intervalles de 20 min, 1 point = 1 intervalle) sur le plan 1-2 de l'ACP-A. Les deux premiers axes expliquent respectivement 6 et 5 % de la variance totale, ce qui est relativement important au vu des 92 variables (2*46 utilisées). **L'axe 1** oppose les variations des durées d'ingestion et de rumination au cours des différents intervalles analysés. Cet axe montre une opposition entre les variations de l'ingestion au cours des 1^{ers} intervalles (2 à 7, soit les 2 premières heures après la distribution) et celles au cours des intervalles 11 à 14 (4 à 5 h après la distribution). Ces variations sont globalement symétriques avec celles des activités de rumination, soulignant l'alternance entre ces activités masticatoires au sein d'un rythme majeur repéré par les temps 2-7 et 11-14. **L'axe 2** traduit l'existence d'une rythmicité secondaire par rapport à la précédente. Il oppose, respectivement, les durées d'ingestion et de rumination des intervalles 1-2 vs 5-6 et 9-14 vs la suite des cinétiques. Comme pour l'axe 1, les activités d'ingestion et de rumination sont en opposition de phase, les intervalles comprenant des durées importantes de rumination sont situés dans la partie positive de l'axe 2, les intervalles qui comprennent plus d'ingestion sont situés dans sa partie négative.

La répartition des 442 AJ utilisés dans le plan 1-2 de l'ACP-A, avec un codage couleur par chèvre (Figure 4), suggère que la majorité des chèvres a présenté des points relativement groupés dans une partie délimitée de ce plan, même si quelques points sont toujours excentrés. La représentation des barycentres de chaque chèvre dans ce même plan (Figure 5) confirme que chaque chèvre est représentée à un endroit différent du plan. De plus, les erreurs standards présentées sur la Figure 5 montrent que le profil de comportement alimentaire des chèvres est plus ou moins stable au cours du temps selon les individus.

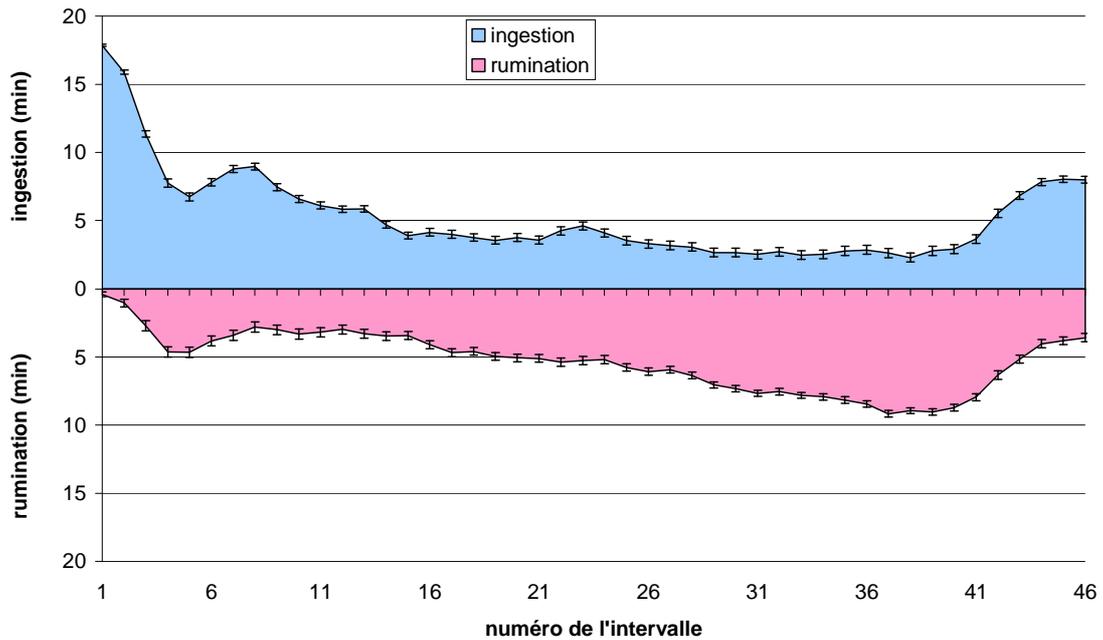


Figure 2. Moyenne et erreur standard, pour les 442 animaux-jours utilisés dans l'ACP-A, des durées d'ingestion et de rumination pour chacun des 46 intervalles de 20 min entre la distribution du soir et celle du matin.

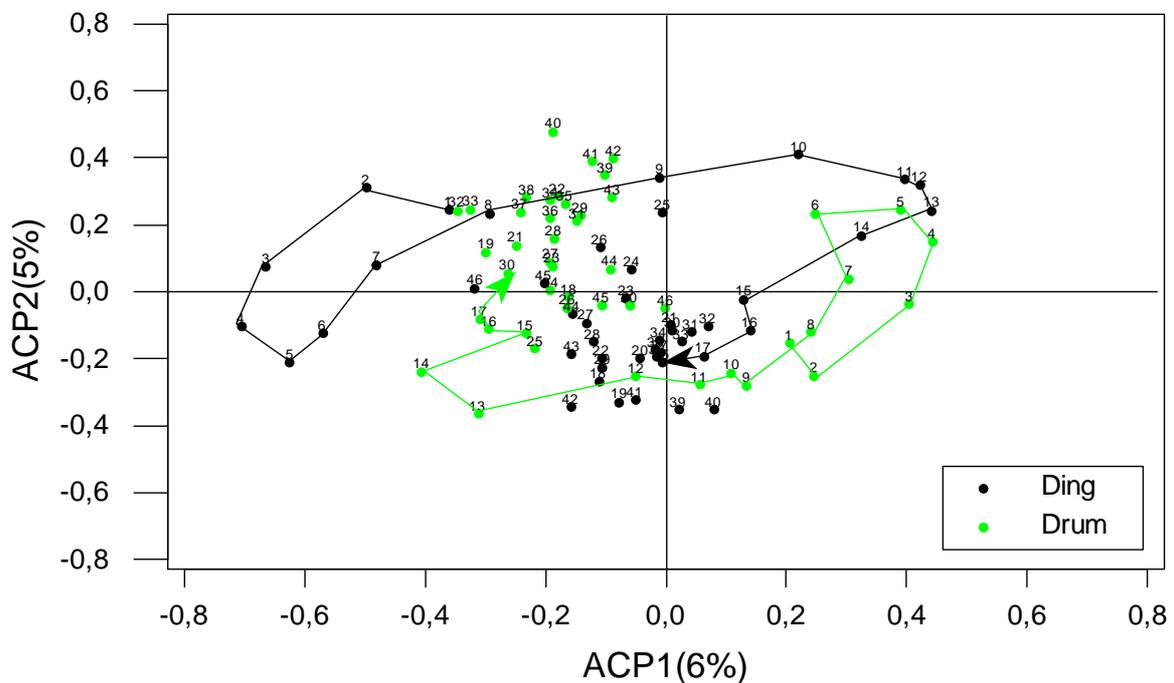


Figure 3. Projection des variables (Ding et Drum) sur le plan 1-2 de l'ACP-A réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination par intervalles de 20 min entre le repas du soir et celui du matin. Les numéros représentent les numéros des intervalles (1 = distribution du soir à 46), les traits relient les 17 premiers intervalles (6 premières heures) pour chaque variable.

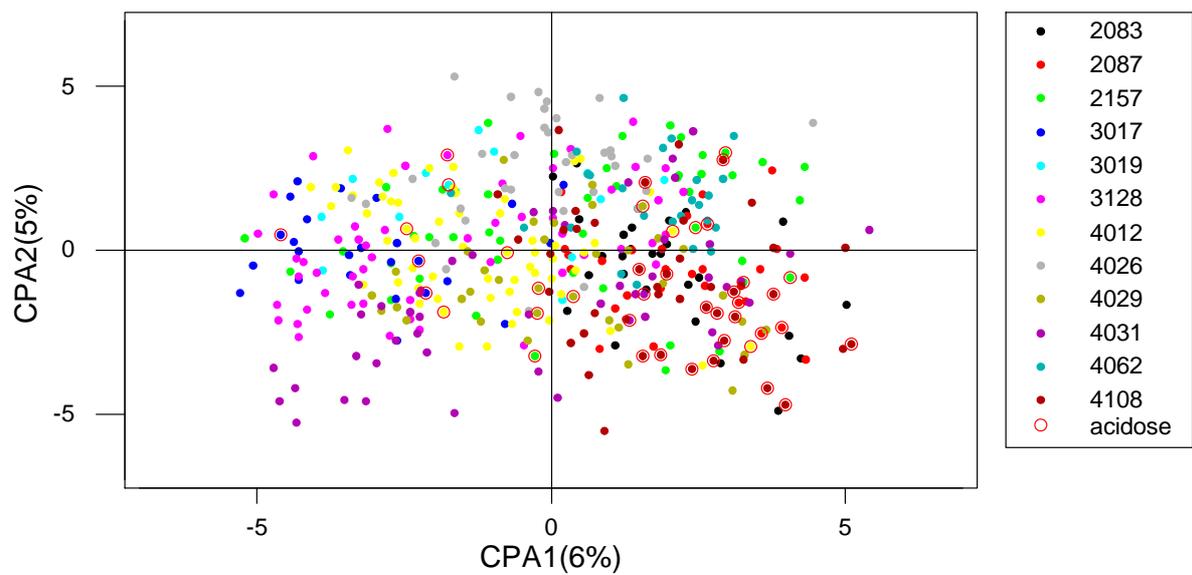


Figure 4. Projection des « animaux-jours » dans le plan 1-2 de l'ACP-A réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination par intervalles de 20 min entre le repas du soir et celui du matin. Le codage couleur a été réalisé par numéro de chèvre. Les jours pendant lesquels l'animal était en crise d'acidose sont entourés en rouge.

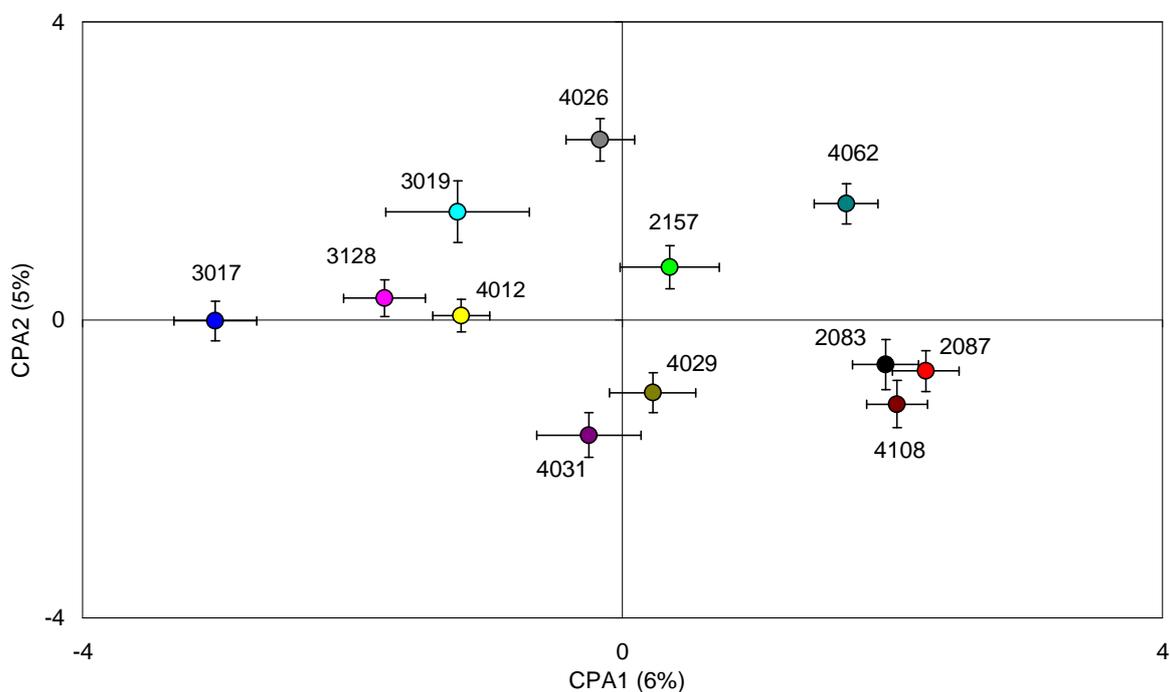


Figure 5. Représentation du barycentre et de son erreur standard pour chaque chèvre dans le plan 1-2 de l'ACP-A réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination par intervalles de 20 min entre le repas du soir et celui du matin. Le codage couleur a été réalisé par numéro de chèvre

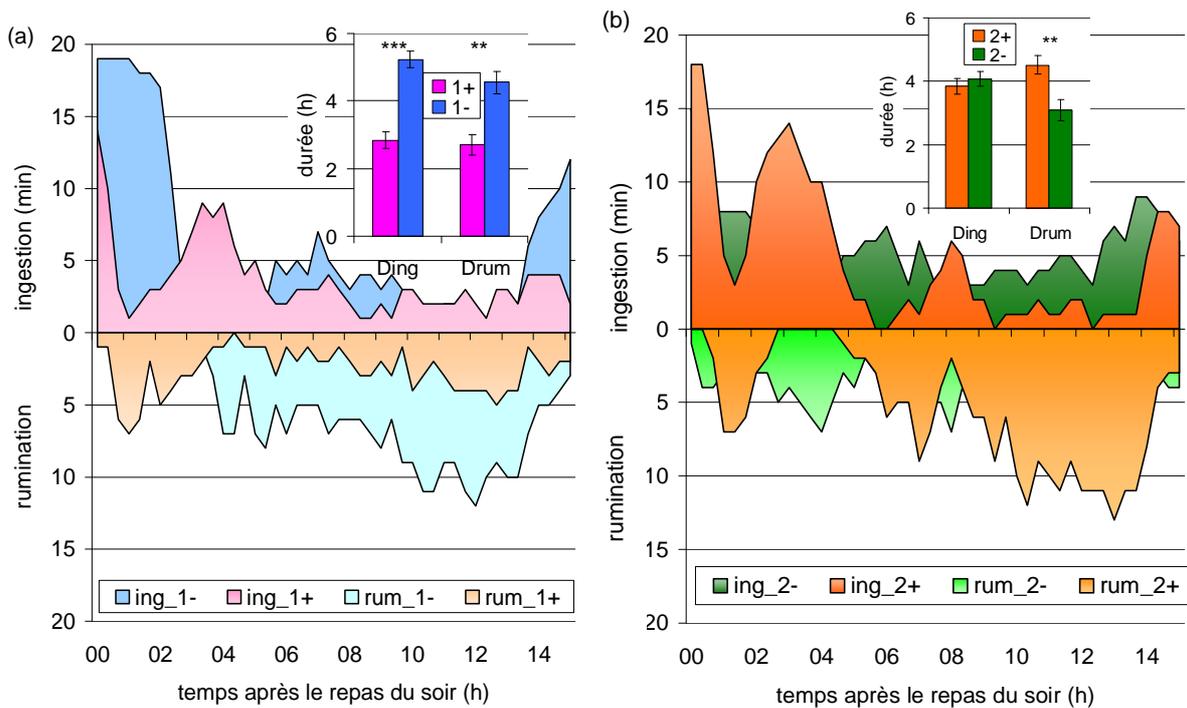


Figure 6. Cinétiques moyennes d'ingestion (ing) et de rumination (rum) des 10 % d'« animaux-jours » extrêmes (44 dans chaque groupe) sur les axes 1 (a) et 2 (b) de l'ACP-A réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination de 442 « animaux-jours » par intervalles de 20 min entre le repas du soir et celui du matin. Les histogrammes présentent les durées estimées d'ingestion et de rumination sur les 15 h considérées. († $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$)

Analyse des extrêmes sur l'ACP-A

Les 44 AJ extrêmes sur chaque axe ont été isolés. **L'axe 1** (Figure 6 a) a permis de différencier, d'une part, des AJ qui ont présenté un grand repas majeur, puis une activité de rumination allant croissante le reste du temps et enfin une reprise de l'ingestion juste avant la traite du matin (groupe « bleu » = « 1⁻ »), et d'autre part, des AJ qui ont présenté un premier repas relativement court (1 h), suivi d'une phase de rumination, puis un second repas en rebond plus long (3 h à 5 h après la distribution du soir), puis des périodes d'ingestion et de rumination alternées et équilibrées le reste du temps sans reprise importante d'ingestion avant la traite du matin (groupe « rose » = « 1⁺ »). Simultanément à l'opposition entre ingestion et rumination durant les premières heures après la distribution, l'axe 1 représente une différenciation significative des durées d'ingestion et de rumination totales, car les AJ du groupe « 1⁺ » ont passé presque deux fois moins de temps à ingérer que ceux du groupe « 1⁻ » et ont également passé moins de temps à ruminer. Les animaux qui ont réalisé un grand repas, puis une grande période de rumination, ont donc passé plus de temps à ingérer et à ruminer que ceux qui ont alterné périodes d'ingestion et de rumination. Si la quantité totale ingérée sur ces 15 h a été similaire, cette différence de comportement peut avoir influencé les fermentations et le pH ruminal. Ces données n'étant pas disponibles pour chacun des 442 AJ utilisés, une analyse plus spécifique des AJ concernés est présentée par la suite.

L'axe 2 (Figure 6 b), confirme et complète le précédent. Il confirme l'existence, après la distribution, d'un repas bi-phasique en opposition à un repas ininterrompu. En outre, il a permis de différencier, d'une part, des AJ qui ont présenté, en plus du repas-rebond, plusieurs repas indépendants entrecoupés par des périodes assez bien différenciées de rumination, une très importante période de rumination et une reprise de l'ingestion avant la traite du matin (groupe « orange » = « 2⁺ »), et d'autre part, des AJ qui ont présenté des périodes d'ingestion et de rumination alternées tout au long de la journée (groupe « vert » = « 2⁻ »). Simultanément à l'opposition entre ingestion et rumination à partir de 6 h après la distribution, l'axe 2 permet de différencier des AJ qui, à durée égale d'ingestion, ruminent plus ou moins longtemps, car les AJ des 2 groupes ont passé globalement le même temps à ingérer, mais ceux du groupe « 2⁺ » ont passé plus de temps à ruminer que ceux du groupe « 2⁻ ». Les animaux qui ont présenté des périodes d'ingestion et de rumination mieux individualisées ont ruminé plus longtemps que ceux qui ingèrent et ruminent alternativement tout au long de la journée.

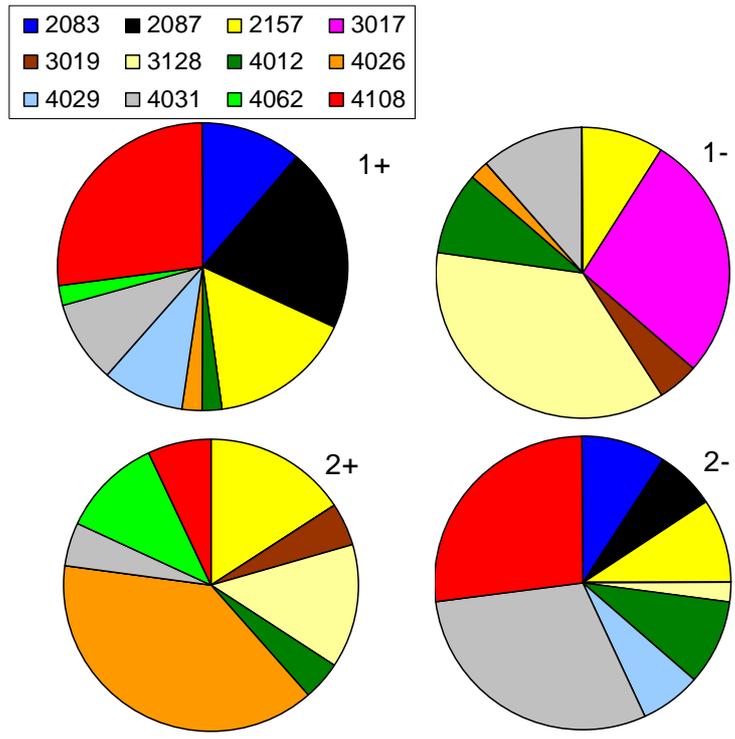


Figure 7. Contribution relative des différents individus aux groupes d'« animaux-jours » extrêmes sur les axes 1 et 2 de l'ACP-A. réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination par intervalles de 20 min pendant les 15 heures suivant la distribution du soir.

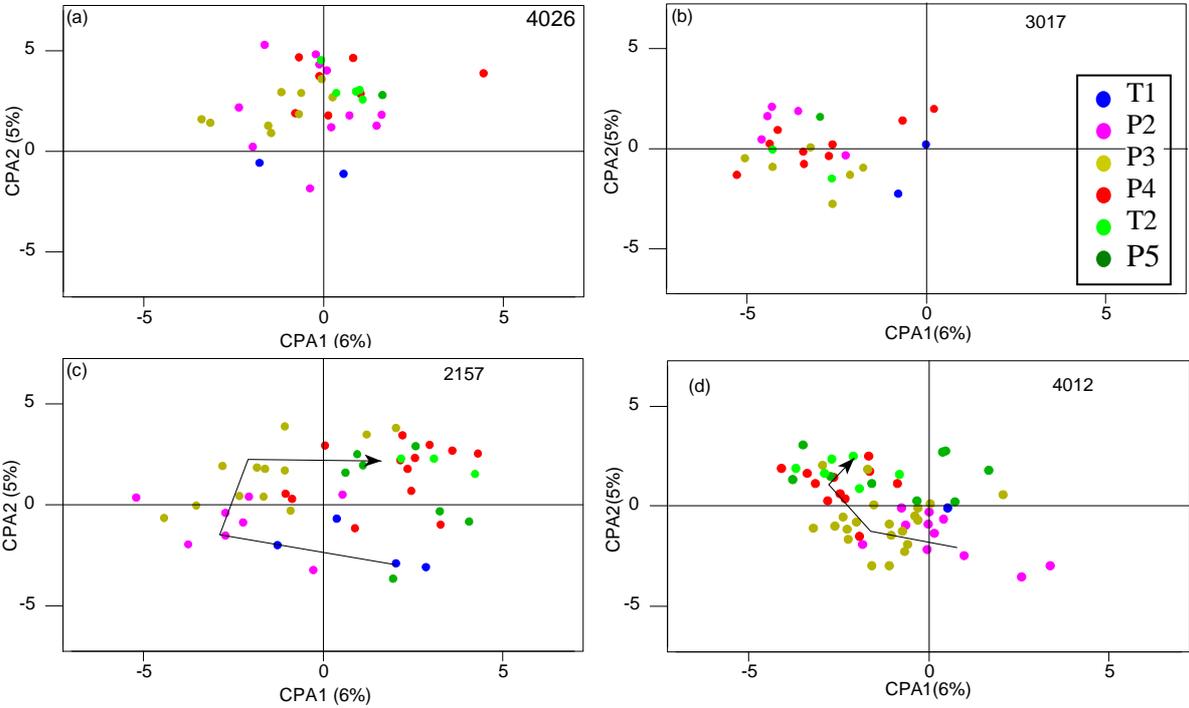


Figure 8. Exemple d'évolution du comportement alimentaire de quatre chèvres (4026, 3017, 2157 et 4012) dans le plan 1-2 de l'ACP-A réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination par intervalles de 20 min pendant les 15 heures suivant la distribution du soir. Les flèches représentent l'évolution du comportement des animaux au cours du temps (jours).

En résumé, les éléments majeurs de la diversité des comportements observés sur ces deux axes sont : -1- l'existence, ou l'absence, d'un premier repas à caractère biphasique, -2- une activité de rumination nocturne importante et croissante et -3- l'association ou l'opposition de ces éléments de diversité sur les axes 1 et 2.

Le comportement des AJ des groupes « 1⁻ » et « 2⁺ » est plus cohérent avec la littérature montrant un repas principal après chaque distribution, suivi par des périodes d'ingestion intermédiaires (Abijaoudé, 1999), et une période de rumination principalement nocturne (Beauchemin *et al.*, 1990 ; Deswysen *et al.*, 1993 ; Fischer *et al.*, 2002) que celui des groupes « 1⁺ » et « 2⁻ ». La répartition relativement homogène des AJ dans le plan 1-2 de cette ACP (Figure 4) montre cependant que tous les comportements forment un continuum. Les formes fortes présentées ne représentent donc pas des comportements très accidentels ou excentrés. Jarrige *et al.* (1995) ont d'ailleurs observé que des vaches laitières, présentant des poids vifs, des productions et des quantités ingérées (à volonté) similaires, pouvaient présenter des vitesses d'ingestion moyennes très voisines, mais des vitesses d'ingestion instantanées variant du simple au double en début de repas. Celle qui ingérait le repas principal avec une vitesse extrêmement élevée présentait un accroissement de sa durée de rumination, par rapport aux autres animaux (Jarrige *et al.*, 1995).

Stabilité du comportement pour un individu donné

Pour chaque groupe d'extrêmes, un ou deux animaux ont généralement représenté la majorité des AJ utilisés (Figure 7), ce qui confirme que ces AJ extrêmes ne sont pas des « accidents ». Certains individus, les chèvres 4026 et 3017 par exemple, ont respectivement dominé les groupes « 2⁺ » et « 1⁻ », mais ont été très peu représentées dans les autres groupes extrêmes. On peut donc en conclure que ces chèvres ont eu une dynamique intra-jour du comportement alimentaire très caractéristique, mais peu de variabilité inter-jours au cours de l'expérience. En revanche, certaines chèvres, comme la chèvre 2157 ou la chèvre 4012, ont été représentées dans les quatre groupes d'extrêmes. Elles semblent donc avoir eu un comportement alimentaire peu répétable, présentant successivement les quatre types de comportements majeurs détectés. Ceci est confirmé par la Figure 8 montrant que les chèvres 4026 (Figure 8 a) et 3017 (Figure 8 b) ont présenté des points relativement groupés dans une zone particulière du plan, tandis que les chèvres 2157 (Figure 8 c) et 4012 (Figure 8 d) ont vu leur comportement évoluer au cours du temps. Ces résultats montrent que la variabilité inter-jours est plus ou moins importante selon les individus, ce qui pourrait influencer la différence de susceptibilité des chèvres à l'acidose.

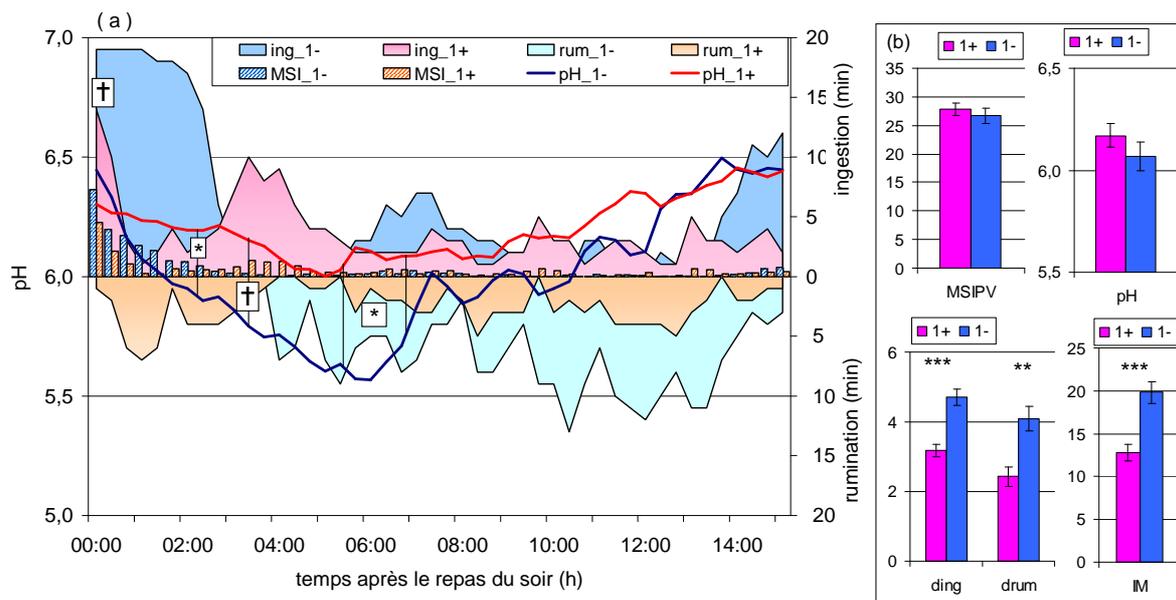


Figure 9. (a) Cinétiques moyennes d'ingestion (ing), de rumination (rum), de pH ruminal et de MSIPV (g/kg PV) des « animaux-jours » extrêmes de l'ACP-A qui possédaient des valeurs de pH et de MSI (12 et 18 AJ pour les groupes « 1⁻ » et « 1⁺ », respectivement). Les histogrammes présentent les quantités ingérées, les lignes continues le pH ruminal. Les seuils de probabilités s'appliquent uniquement au pH ruminal. (b) Valeurs moyennes et erreurs standards de la MSIPV (g/ kg PV), du pH, des durées d'ingestion et de rumination (h) et de l'indice de mastication (min / g MSIPV) sur les 15 h suivant la distribution du soir. († $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$)

Relation entre le comportement, les quantités ingérées et le pH ruminal moyen

Douze AJ du groupe « 1⁻ », 18 du groupe « 1⁺ », 9 du groupe « 2⁻ » et 11 du groupe « 2⁺ » présentaient des mesures de pH et de MSIPV pour les 46 intervalles formant les 15 heures considérées. La répartition de l'ingestion et de la rumination observée uniquement sur ces AJ (Figure 9 et Figure 10, pour les axes 1 et 2, respectivement) est très semblable à celle observée sur les groupes totaux (Figure 6). Les variations de pH et de MSIPV observées sur ces AJ sont donc probablement représentatives de celles du groupe total. Sur **l'axe 1**, les AJ du groupe « 1⁺ » ont passé moins de temps à ingérer et à ruminer que ceux du groupe « 1⁻ », ce qui est cohérent avec les analyses réalisées sur les groupes totaux. En revanche, aucune influence du groupe n'a été détectée sur la MSIPV et le pH moyen ruminal. En conséquence, l'indice de mastication a été plus faible pour les AJ du groupe « 1⁺ » que pour ceux du groupe « 1⁻ ». Sur **l'axe 2**, les AJ du groupe « 2⁺ » ont passé deux fois plus de temps à ruminer que ceux du groupe « 2⁻ », mais aucune influence du groupe sur la MSIPV, le pH moyen ruminal et la durée d'ingestion n'a été détectée. En conséquence, l'indice de mastication a été plus important pour le groupe « 2⁺ » que pour le groupe « 2⁻ ». Ceci est cohérent avec les analyses réalisées sur les groupes totaux.

Il serait intéressant de pouvoir vérifier ces résultats sur un nombre plus important d'individus, car moins de la moitié des AJ de chaque groupe a été utilisée pour cette analyse. Toutefois, cela montre que, pour des quantités totales ingérées similaires, les animaux peuvent présenter des durées de mastication très différentes, et que ces différences n'entraînent pas nécessairement de modifications du pH ruminal moyen. Des AJ recevant les deux régimes étaient présents dans chacun des quatre groupes utilisés. Le pH moyen similaire observé pour des durées de mastication différentes n'est donc pas dû au fait que les groupes représentaient des régimes différents, mais probablement à la différence d'organisation des périodes d'ingestion et de rumination au cours de la journée.

Cinétiques de comportement alimentaire et de pH ruminal

Malgré des pH moyens similaires entre les groupes, les cinétiques de pH ont été très différentes au cours des 15 h observées (Figure 9 a et Figure 10 a). Les groupes « 1⁻ » et « 2⁺ » ont présenté une chute de pH plus marquée que leurs groupes opposés respectifs. Ces résultats suggèrent que le niveau ou la vitesse d'ingestion pendant les 3-4 premières heures est l'élément déterminant de la chute du pH, que ce soit pour un repas mono- (« 1⁻ ») ou biphasique (« 2⁺ »). De plus, dans les deux cas, la remontée du pH ruminal est la conséquence d'une activité de rumination importante et croissante pendant la phase nocturne.

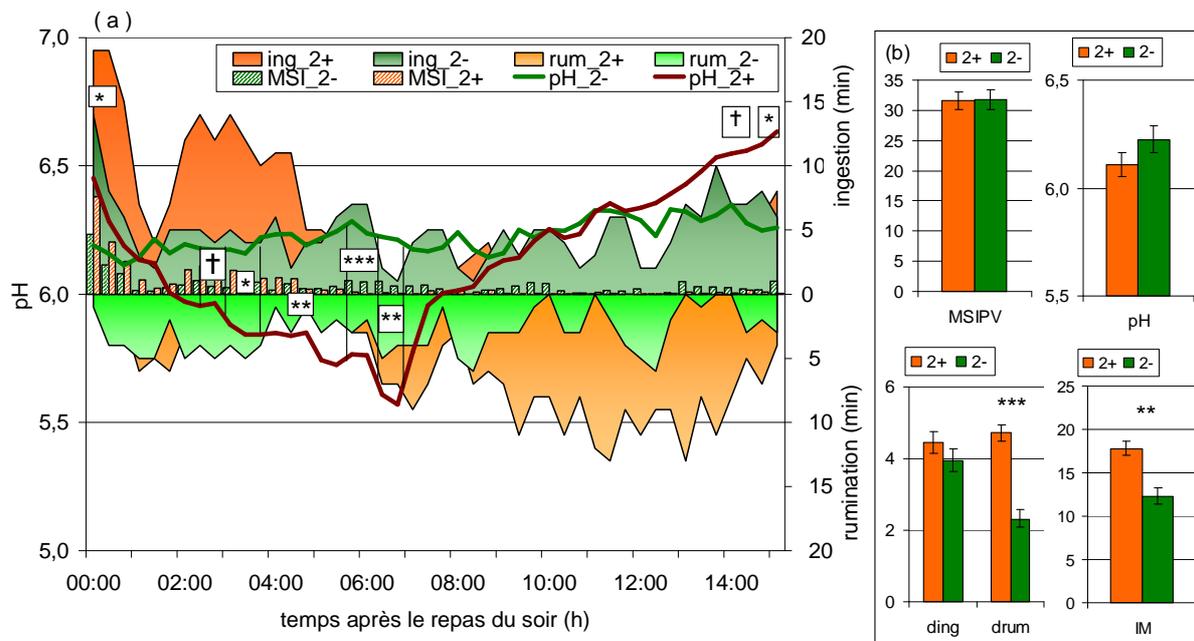


Figure 10. (a) Cinétiques moyennes d'ingestion (ing), de rumination (rum), de pH ruminal et de MSIPV (g/kg PV) des « animaux-jours » extrêmes de l'ACP-A qui possédaient des valeurs de pH et de MSI (9 et 13 AJ pour les groupes « 2⁻ » et « 2⁺ », respectivement). Les histogrammes présentent les quantités ingérées, les lignes continues le pH ruminal. Les seuils de probabilités s'appliquent uniquement au pH ruminal. (b) Valeurs moyennes et erreurs standards de la MSIPV (g/kg PV), du pH, des durées d'ingestion et de rumination (h) et de l'indice de mastication (min / g MSIPV) sur les 15 h suivant la distribution du soir. († $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$)

Tableau 2. Effet du régime, des crises d'acidose et du temps (jour) (coefficients estimés) sur les coordonnées des « animaux-jours » sur les axes 1 et 2 de l'ACP-A réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination de ces « animaux-jours » par intervalles de 20 min pendant les 15 heures suivant la distribution du soir.

	n ^a	Régime			Acidose		Jour		rmse
		L	H	P	Coef	P	Coef	P	
Axe 1	442	- 0,4	- 1,1	***	+ 1,5	***	+ 0,02	***	1,76
Axe 2	442	- 0,7	- 2,2	†	- 0,5	***	+ 0,02	***	1,64

^a nombre d'« animaux-jours » utilisés

† $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

Ces résultats sont cohérents avec l'observation que des vaches laitières, présentant des poids vifs, des productions, des quantités ingérées (à volonté) et des vitesses d'ingestion moyennes similaires, pouvaient présenter des vitesses d'ingestion instantanées variant du simple au double en début de repas, et que celle qui ingérait le repas principal avec une vitesse extrêmement élevée présentait des variations plus importantes des paramètres physico-chimiques du rumen (Jarrige *et al.*, 1995). Ceci montre également qu'une mesure unique du pH ruminal juste avant la distribution de nourriture n'est pas représentative du pH moyen quotidien ou du minimum postprandial. En effet, les groupes qui ont des pH plus élevés avant la distribution présentent des pH minimums beaucoup plus faibles que leurs groupes opposés respectifs, mais des pH moyens similaires sur la période analysée.

Les deux groupes qui ont présenté les chutes de pH marquées sont les groupes qui ont présenté des indices de mastication plus élevés que leurs groupes opposés respectifs. Les AJ qui ont présenté des périodes d'ingestion et de rumination très distinctes, donc des repas structurés, ont donc mastiqué plus longtemps par gramme d'aliment ingéré que les AJ qui ont alterné petites périodes d'ingestion et de rumination. L'apport plus important de tampon dans le rumen, suite à cette mastication supérieure, n'a pas permis d'augmenter le pH moyen quotidien mais a entraîné une remontée plus importante du pH. Le réflexe de rumination étant stimulé par la présence de contenus ruminiaux importants (encombrement) et leur caractère fibreux (Welch et Smith, 1971), les animaux qui ingèrent très rapidement en un seul repas, ont une augmentation plus rapide et importante de l'encombrement du rumen, et pourraient donc avoir besoin de ruminer plus longtemps après le repas par rapport aux animaux qui ingèrent et ruminent alternativement.

Comme cela a déjà été évoqué, des AJ en régime H et en régime L étaient présents dans chacun des quatre groupes d'analyse utilisés, tous les types de comportements ont donc été observés sur les deux régimes.

Influence des crises d'acidose sur le comportement alimentaire

Si l'on définit l'acidose sub-clinique par le pourcentage de temps passé sous un pH seuil de 6,0 (Maekawa *et al.*, 2002 ; Beauchemin *et al.*, 2003), les AJ du groupe « 2⁺ » ont eu tendance à passer plus de temps sous un pH seuil de 6,0 que les AJ du groupe « 2⁻ » ($39 \pm 7\%$ et $17 \pm 8\%$, respectivement ; $P = 0,06$), et ont donc présenté une situation d'acidose sub-clinique plus importante que les AJ du groupe « 2⁻ ». Même si la différence n'est pas significative, ce qui peut être dû au faible nombre d'AJ utilisés, les AJ du groupe « 1⁻ » ont également passé numériquement plus de temps sous un pH seuil de 6,0 que les AJ du groupe

« 1⁺ » ($41 \pm 8 \%$ et $27 \pm 7 \%$, $P = 0,2$), et semblent donc présenter une situation d'acidose sub-clinique plus importante. Cette étude montre que la définition de l'acidose sub-clinique par la mesure du pH moyen quotidien, ou par la mesure de quelques valeurs quotidiennes, est très discutable, et que ces mesures ne sont pas représentatives de l'évolution du pH entre deux distributions.

Les AJ en crise d'acidose sont préférentiellement représentés dans la partie positive de l'axe 1 et négative de l'axe 2 (Tableau 2), ce qui est contraire à l'analyse de l'acidose réalisée sur le pourcentage de temps passé sous un pH seuil de 6,0. Cela confirme néanmoins la différence (discutée au chapitre 3.1) entre une situation d'acidose sub-clinique caractérisée par des chutes de pH au cours de la journée, et des crises d'acidose caractérisées par une chute d'appétit induite par une chute initiale très brutale du pH moyen ruminal. Ainsi, alors que la situation d'acidose sub-clinique semble être augmentée pour les animaux des groupes « 1⁻ » et « 2⁺ », les animaux en crise d'acidose présentent plutôt des comportements du type « 1⁺ » et « 2⁻ ». Ils présentent une diminution de leur durées d'ingestion et de rumination (vers le groupe « 1⁺ ») et une déstructuration de l'organisation des repas vers de petits épisodes d'ingestion et de rumination alternés (vers le groupe « 2⁻ »). Ceci est cohérent avec le fait que ces crises sont caractérisées par un manque d'appétit, et une aversion pour le régime (chapitre 3.1).

Influence du régime sur le comportement alimentaire

Le régime H, riche en concentré, a été plus observé dans les parties négatives des deux axes (Tableau 2). Au cours de l'expérience, les animaux ont modifié leur comportement alimentaire vers les extrémités positives des deux axes (Tableau 2). Comme la période P1 représentait la période d'adaptation des animaux aux appareils de mesure en continu, très peu de données sont disponibles en régime L pendant cette période. Il existe donc certainement une confusion d'effets, dans notre analyse, entre l'effet du temps et l'effet du régime, car la majorité des AJ en régime L provient de la période P5, et un effet rémanent du régime H ou des épisodes d'acidose pouvait être présent pendant cette période.

Le régime H semble avoir entraîné une diminution du nombre de périodes d'ingestion et de rumination, vers le comportement extrême du groupe « 1⁻ » caractérisé par la réalisation d'un seul grand repas, suivie d'une grande période de rumination. Ceci est assez surprenant, et contraire aux résultats d'Abijaoudé *et al.* (2000a) et aux résultats présentés au chapitre 2.1 qui montrent que l'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration augmente le nombre de repas et la répartition de l'ingestion au cours de la journée. Cependant, le régime H a

également eu tendance à entraîner une déstructuration de l'organisation des repas (vers le comportement extrême du groupe « 2 »), ce qui cette fois serait en accord avec les résultats d'Abijaoudé *et al.* (2000a). Cependant, seule une tendance a été observée, ces résultats sont donc à confirmer, et les effets du régime obtenus avec cette ACP sont difficiles à interpréter. Ceci peut être dû à la confusion d'effets entre le temps et le régime, mais aussi aux conséquences des crises acidoses, ou à la très forte variabilité individuelle observée. En effet, lorsque l'analyse est réalisée par chèvre, seul le comportement alimentaire de cinq chèvres sur les onze qui possédaient des valeurs pour les deux régimes a été influencé par le régime (données non présentées).

Il est difficile de déterminer, avec notre dispositif expérimental, si les animaux ont modifié leur comportement alimentaire pour s'adapter au régime ou suite aux crises d'acidose. Ainsi la chèvre 2057 (Figure 8 c) a présenté trois crises d'acidoses dont deux d'ampleur moyenne (groupe 2 cf. chapitre 3.1) et la chèvre 4012 (Figure 8 d) a présenté deux crises d'acidose dont une très importante (groupe 3 cf. Chapitre 3.1). Ces deux chèvres pourraient avoir modifié leur comportement suite aux crises d'acidose, et non pas suite à la modification du régime. Ceci est confirmé par le fait que la chèvre 4026 (Figure 8 a) n'a pas présenté de crises d'acidose et n'a pas modifié son comportement. En revanche, la chèvre 3017 (Figure 8 b) a présenté deux crises d'acidose (groupes 2 et 1 cf. Chapitre 3.1), mais n'a pas modifié son comportement. La variabilité individuelle semble donc extrêmement importante, non seulement inter-individus, mais également inter-jours pour un même individu en ce qui concerne la réponse à la modification du pourcentage de concentré ou aux épisodes de perturbations digestives.

Lorsque la production laitière est ajoutée en covariable dans le modèle utilisé ci-dessus, on observe un net effet du niveau de la production laitière sur l'axe 1 ($-0,8 \pm 0,22$ points sur l'axe 1 par kg de lait produit en plus, $P < 0,001$), mais pas d'effet sur l'axe 2 ($P > 0,1$). La réalisation d'un seul grand repas, suivi d'une période de rumination intense, semble donc être liée à une production laitière plus importante, malgré un pH ruminal plus variable. Cependant, le régime riche en concentré a également été plus représenté dans la partie négative de l'axe 1, tandis que les crises d'acidoses, qui induisent des chutes de production, ont été plus représentées dans la partie positive de l'axe 1. Les effets du régime et de l'acidose ayant été inclus dans l'analyse, la production laitière supérieure dans cette partie négative de l'axe 1 semble bien être due, au moins en partie, au fait que les animaux réalisent un grand repas, suivi d'une grande période de rumination. Toutefois, les deux animaux qui présentaient les productions lactées les plus élevées en début de lactation (avant le début de l'expérience)

sont les deux chèvres les plus extrêmes de chaque côté de l'axe 1 (chèvres 3017 et 2087). Ces résultats sont à confirmer sur un nombre plus important d'animaux, et pour des animaux recevant un même régime.

Influence du comportement alimentaire sur la susceptibilité des animaux à l'acidose

Pour les animaux ayant un comportement alimentaire relativement stable tout au long de l'expérience, aucun lien n'a pu être mis en évidence entre la position de l'animal dans le plan 1-2 et le nombre de crises d'acidose, ou l'ampleur des crises d'acidose observées (cf. les graphes individuels en Annexe 3). Ainsi les trois chèvres dont les barycentres sont très proches sur la Figure 5, et dont le comportement alimentaire moyen semble donc similaire, n'ont pas présenté la même susceptibilité à l'acidose. La chèvre 2083 n'a présenté aucune crise d'acidose, la chèvre 2087 a présenté une crise d'acidose d'ampleur importante, et la 4108 a présenté quatre crises d'acidose, donc deux d'ampleur importante et deux d'ampleur moyenne. Contrairement à ce qui était attendu, le type de comportement alimentaire présenté par un animal donné, et déterminé par cette analyse, ne semble pas être un facteur expliquant la différence de susceptibilité des animaux à l'acidose observée pendant cette expérience. L'analyse a cependant été réalisée sur toutes les périodes de l'expérience. La position du barycentre de chaque chèvre est donc certainement influencée par l'occurrence des acidoses ou le changement de régime, en particulier pour les animaux qui ont modifié leur comportement au cours de l'expérience. Une étude similaire, réalisée uniquement avant la distribution du régime riche en concentré, pourrait permettre de déterminer plus précisément, et sans confusion d'effets, si le comportement individuel a une influence sur la susceptibilité des animaux à l'acidose.

ACP-B : comportement et pH ruminal

La Figure 11 présente la projection des variables dans le plan 1-2 de cette ACP-B. Les axes 1 et 2 représentent respectivement 13 et 7 % de la variabilité totale, ce qui est supérieur à la proportion de variance expliquée par les axes de l'ACP-A malgré le nombre plus élevé de variables utilisées pour cette ACP-B ($4 \times 46 = 184$). L'axe 1 présente principalement une différenciation du pH ruminal. L'opposition entre les durées d'ingestion et de rumination pendant les premières heures suivant la distribution est à nouveau visible sur cette ACP, mais est représentée simultanément par les deux axes.

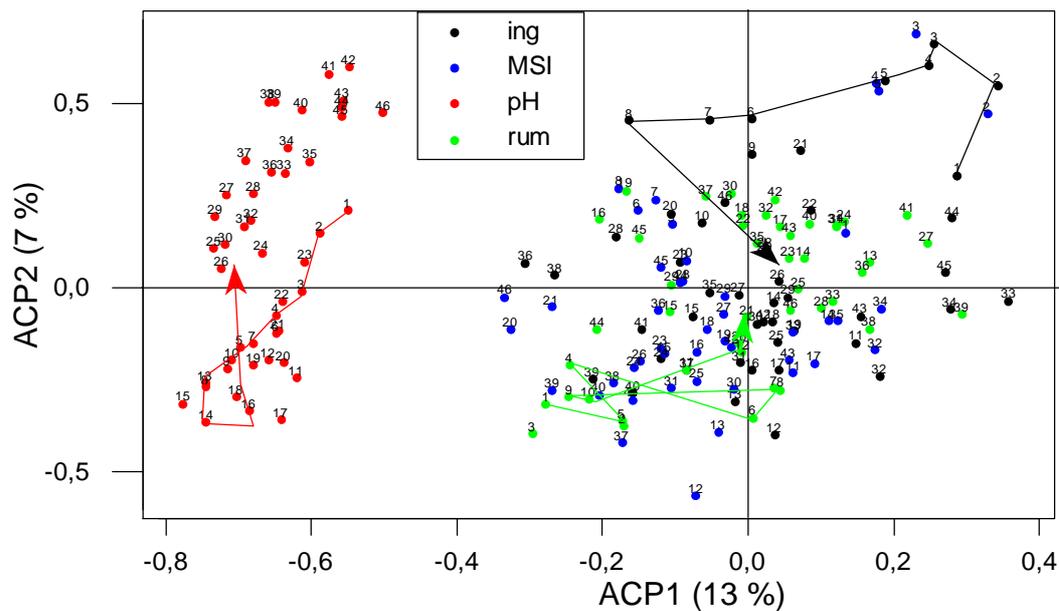


Figure 11. Projection des variables dans le plan 1-2 de l'ACP-B réalisée simultanément sur les durées d'ingestion et de rumination, le pH ruminal et la MSIPV par intervalles de 20 min pendant les 15 h suivant la distribution du soir, uniquement pour des animaux recevant le régime H, et non en crise d'acidose. Les numéros représentent les numéros des intervalles (1 = distribution du soir à 46), les traits relient les premiers intervalles (environ 6 premières heures) pour chaque variable.

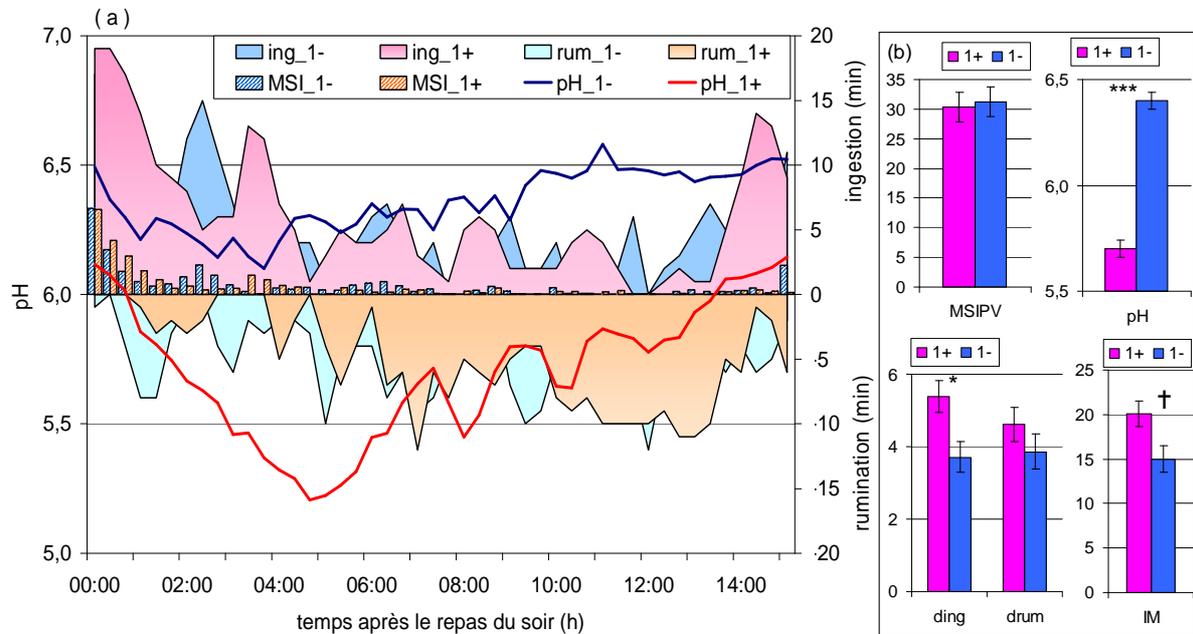


Figure 12. (a) Cinétiques moyennes d'ingestion (ing), de rumination (rum), de pH ruminal et de MSIPV (g / kg PV) des 10 % d'« animaux-jours » extrêmes (7 dans chaque groupe) sur l'axe 1 de l'ACP-B réalisée simultanément sur les durées d'ingestion et de rumination, le pH ruminal et la MSIPV par intervalles de 20 min pendant les 15 h suivant la distribution du soir. Les histogrammes présentent les quantités ingérées, les lignes continues le pH ruminal. (b) Valeurs moyennes et erreurs standards de la MSIPV, du pH, des durées d'ingestion et de rumination (h) et de l'indice de mastication (min / g MSIPV) sur les 15 h suivant le repas du soir. († $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$)

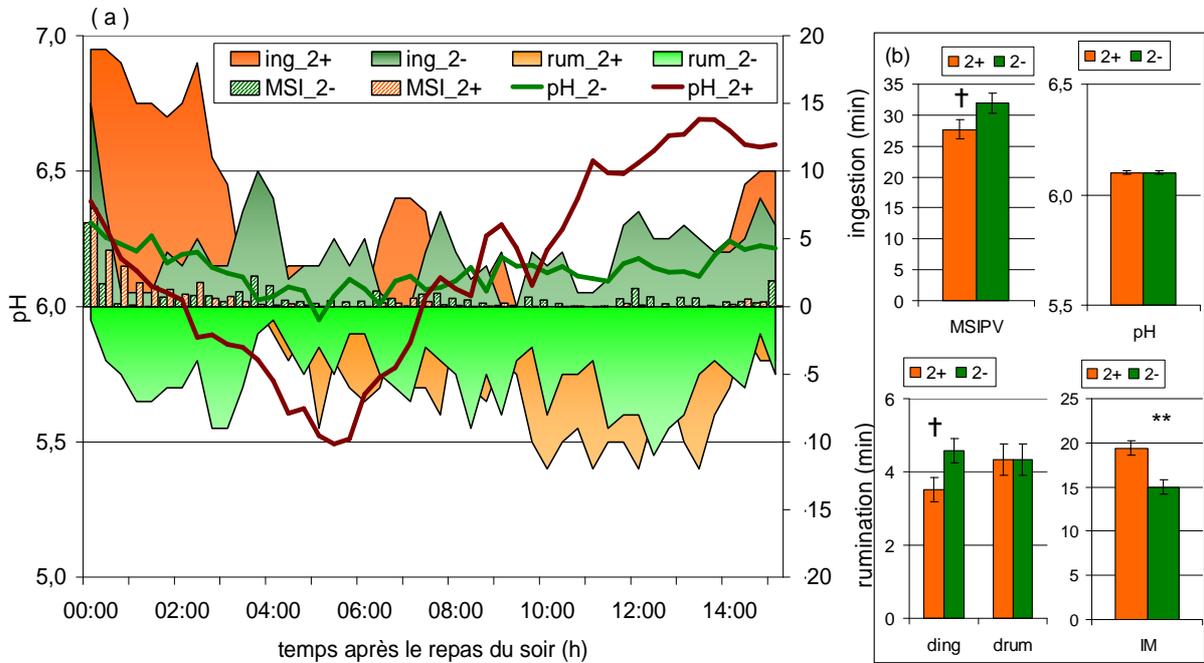


Figure 13. (a) Cinétiques moyennes d'ingestion (ing), de rumination (rum), de pH ruminal et de MSIPV (g/kg PV) des 10 % d'« animaux-jours » extrêmes (7 dans chaque groupe) sur l'axe 2 de l'ACP-B réalisée simultanément sur les durées d'ingestion et de rumination, le pH ruminal et la MSIPV par intervalles de 20 min pendant les 15 h suivant la distribution du soir. Les histogrammes présentent les quantités ingérées, les lignes continues le pH ruminal. (b) Valeurs moyennes et erreurs standard de la MSIPV, du pH, des durées d'ingestion et de rumination (h) et de l'indice de mastication (min / g MSIPV) sur les 15 h suivant le repas du soir. († $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$)

La représentation des cinétiques d'ingestion, de rumination et de pH ruminal des AJ extrêmes sur les axes 1 et 2 de cette ACP-B (Figure 12 et Figure 13) montre que les cinétiques de comportement et de pH sont relativement similaires à celles issues de l'ACP-A, avec, sur chaque axe, un groupe présentant deux périodes distinctes d'ingestion et de rumination, et un groupe présentant des petites périodes alternées d'ingestion et de rumination. Les résultats obtenus sur le pH avec cette ACP-B sont très similaires à ceux obtenus par Dragomir *et al.* (2008) avec une ACP uniquement réalisée avec des paramètres du pH ruminal (pH min et max, amplitude de la chute, pH initial, temps passé sous des seuils...). **L'axe 1** (Figure 12) représente bien une différenciation du pH ruminal, sans modification de la MSIPV ou de la durée de rumination, mais la durée d'ingestion a été supérieure pour le groupe au pH le plus faible. De nouveau, ce sont les AJ qui ont présenté la chute de pH la plus marquée qui ont eu tendance à avoir un indice de mastication plus important. Pour ces AJ, l'apport supérieur de tampon, dû à une durée d'ingestion supérieure, à quantité ingérée égale, n'a pas été suffisant pour contrer la très forte chute de pH postprandiale. Ainsi, le pH des AJ du groupe « 1^{+b} » est resté inférieur à celui du groupe « 1^{-b} » pendant toute la période considérée.

Sur **l'axe 2** (Figure 13), les AJ du groupe « 2^{+b} » ont eu tendance à manger moins et moins longtemps que ceux du groupe « 2^{-b} », mais ces tendances seraient à vérifier sur un nombre plus important d'individus. En revanche, le pH moyen ruminal et la durée totale de rumination ont été similaires entre les deux groupes. Comme pour l'axe 1 et l'analyse précédente, les AJ qui ont montré la chute de pH la plus marquée (groupe « 2^{+b} ») ont présenté un indice de mastication plus important que ceux qui ont eu une chute de pH postprandiale moins marquée. Cependant, l'augmentation de la quantité de tampons apportée par l'indice de mastication supérieur a permis d'obtenir des valeurs de pH nettement supérieures à celles du groupe « 2^{-b} » avant la distribution suivante, sans influence sur le pH moyen quotidien. Les différences de pH ruminal observées dans les sous-groupes d'extrêmes de l'ACP-A, et dans les groupes extrêmes de l'ACP-B sont donc principalement dues à une variation du comportement alimentaire.

Enfin, aucun lien n'a pu être mis en évidence entre les coefficients des AJ sur les deux premiers axes et la production laitière, ce qui confirme qu'il est difficile de dissocier les effets de la production laitière de ceux du régime et de l'acidose, et que l'effet observé sur l'axe 1 de l'ACP-A est à vérifier sur plus de données.

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence la grande diversité des comportements alimentaires observés chez des animaux recevant le même régime, ou des régimes différents, dans les mêmes conditions d'élevage. L'utilisation de méthodes statistiques multivariées a permis d'extraire et de structurer des variations essentielles à partir d'un ensemble de données a priori très diverses. La première ACP a montré que, à quantité ingérée égale, les différences de comportement alimentaire concernent surtout le niveau de structuration des repas. Elles peuvent influencer les cinétiques de pH ruminal, et le pH minimal postprandial, sans influencer le pH moyen quotidien. Lorsque les données de pH ruminal sont incluses dans l'ACP, à quantités ingérées égales, les résultats observés sur les comportements alimentaires sont assez similaires et sont associés à des différences de cinétiques de pH et de pH moyen ruminal. Il apparaît que les animaux ayant un repas plus structuré, suivi d'une phase de rumination nocturne intense présentent une chute de pH plus marquée. Le grand repas suivant la distribution présente, ou ne présente pas, un caractère biphasique marqué. Il serait intéressant de chercher à mieux comprendre la cause de cette variabilité comportementale et d'en évaluer plus amplement les conséquences digestives et zootechniques. Cependant, aucun lien n'a pu être mis en évidence entre le comportement alimentaire et la susceptibilité des chèvres à l'acidose.

Le principal facteur de variation du comportement alimentaire semble être individuel avec des comportements généralement répétables d'un jour à l'autre pour un même individu, mais qui peuvent également évoluer au cours du temps. Pour un individu donné, une modification de la composition du régime, et/ou des perturbations ruminales de type acidose, peuvent entraîner une modification du comportement alimentaire, mais cela n'est pas forcément observé pour tous les individus.

Ces résultats ont été obtenus sur un nombre limité d'animaux. De plus, en raison de problèmes techniques concernant les mesures de pH et de mastication, le comportement de certains animaux n'a pas pu être analysé tout au long de l'expérience, ou n'est disponible que ponctuellement, et les analyses regroupant durées d'ingestion, de rumination, pH et MSIPV ont été réalisées sur un nombre relativement faible de situations. Ces résultats représentent donc une première approche de la typologie du comportement alimentaire de chèvre et de son influence sur le pH ruminal, mais nécessitent d'être confirmés sur un nombre plus important de données. Toutefois, il s'agit d'une approche originale, dont les résultats sont relativement stables malgré des ACP différentes, réalisées sur des variables et des nombres d'AJ différents. Cette méthode peut donc être utilisée pour caractériser le comportement alimentaire de

différents ruminants dans des situations expérimentales et/ou des régimes variés, et de corrélérer ces variations du comportement alimentaire avec les variations de paramètres physiologiques tels que le pH ruminal, afin de mieux comprendre, par exemple, les différences de susceptibilité des animaux à l'acidose et les mécanismes de déclenchement de l'acidose.

Références

- Abijaoudé, J. A. 1999. Influence de la nature du régime sur le comportement alimentaire, la digestion, le métabolisme et les performances des chèvres laitières. Thèse de doctorat: Institut national agronomique Paris-Grignon. 138 p
- Abijaoudé, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P. et Sauvant, D. 2000a. Diet effect on the daily feeding behaviour, frequency and characteristics of meals in dairy goats. *Livest. Prod. Sci.* 64: 29-37.
- Abijaoudé, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P. et Sauvant, D. 2000b. Contribution of main and secondary meals to the daily intake of stall-housed dairy goats in mid lactation. *Options mediterr., Ser. A* 52: 33-37.
- Beauchemin, K. A., Kachanosky, R. G., Schaalje, G. B. et Buchanan-Smith, J. G. 1990. Characterizing rumination patterns of dairy cows using spectral analysis. *J. Anim. Sci.* 68: 3163-3170.
- Beauchemin, K. A., Yang, W. Z., Morgavi, D. P., Ghorbani, G. R., Kautz, W. et Leedle, J. A. Z. 2003. Effects of bacterial direct-fed microbials and yeast on site and extent of digestion, blood chemistry, and subclinical ruminal acidosis in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81: 1628-1640.
- Béchet, G., Brun, J. P. et Petit, M. 1995. Comparison between two methods of measuring the grazing time of ewes. *Ann. Zootech.* 44, suppl.1: 236.
- Brossard, L., Fabre, M., Martin, C. et Michalet-Doreau B. 2003. Validation of continuous ruminal pH measurements by indwelling probes (poster). Conference of Gastrointestinal Function., Chicago. 25.
- Brun, J. P., Prache, S. et Béchet, G. 1984. A portable device for eating behaviour studies. 5th european grazing workshop, Edimbourg, UK. 1-8.
- Deswysen, A. G., Dutilleul, P., Godfrin, J. P. et Ellis, W. C. 1993. Nycterohemeral eating and ruminating patterns in heifers fed grass or corn-silage - Analysis by finite Fourier-transform. *J. Anim. Sci.* 71: 2739-2747.
- Dragomir, C., Sauvant, D., Michalet Doreau, B., Peyraud, J. L. et Giger-Reverdin, S. 2008. Meta-Analysis of 0-8 Hours post-prandial kinetics of ruminal pH. *Animal* In press.

- Dulphy, J. P. et Faverdin, P. 1987. L'ingestion alimentaire chez les ruminants : modalités et phénomènes associés. *Reprod. Nutr. Dev.* 27: 129-155.
- Dulphy, J. P., Carle, B. et Demarquilly, C. 1990. Quantités ingérées et activités alimentaires comparées des ovins, bovins et caprins recevant des fourrages conservés avec ou sans aliment concentré. I. Etude descriptive. *Ann. Zootech.* 39: 95-111.
- Fischer, V., Deswysen, A. G., Dutilleul, P. et De Boever, J. 2002. Ingestive behavior nycterohemeral patterns of dairy cows, at the beginning and at the end of lactation, fed a corn silage based diet. *Rev. Bras. Zootec.* 31: 2129-2138.
- Focant, M. 1984. Comportement alimentaire, rumination, fermentations réticulo-ruminales et acides gras volatils plasmatiques, comparés chez la chèvre et le mouton; influence du régime. *Reprod. Nutr. Dev.* 24: 239-250.
- Heinrichs, A. J. et Conrad, H. R. 1987. Measuring feed intake patterns and meal size of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 70: 705-711.
- Jarrige, R., Dulphy, J. P., Faverdin, P., Baumont, R. et Demarquilly, C. 1995. Activités d'ingestion et de rumination. *Nutrition des ruminants domestiques*. Ed. R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.-H. Farce et M. Journet, INRA: 123-181.
- Maekawa, M., Beauchemin, K. A. et Christensen, D. A. 2002. Effect of concentrate level and feeding management on chewing activities, saliva production, and ruminal pH of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85: 1165-1175.
- Welch, J. G. et Smith, A. M. 1971. Physical stimulation of rumination activity. *J. Anim. Sci.* 33: 1118-1123.

CHAPITRE 4

Influence des levures et de l'acidose sur les paramètres zootechniques et physiologiques

CHAPITRE 4 : Influence des levures et de l'acidose sur les paramètres zootechniques et physiologiques

1. Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres laitières recevant deux régimes différant par leur pourcentage de concentré. Influence sur les paramètres zootechniques, le pH ruminal et la digestibilité

Live yeast supplementation and acidosis in dairy goats receiving two diets differing by their percentage of concentrate. Influence on intake, production, ruminal pH and digestibility

2. Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres laitières. Influence sur les paramètres ruminiaux et sanguins

1. Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres laitières recevant deux régimes différant par leur pourcentage de concentré. Influence sur les paramètres zootechniques, le pH ruminal et la digestibilité

L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration de ruminants peut entraîner une acidose sub-clinique et une perturbation des fermentations ruminales. L'apport de levures pourrait permettre de limiter les variations des paramètres physico-chimiques du rumen et d'augmenter la production des animaux recevant des régimes riches en concentré.

Objectif

→ Analyser simultanément l'influence du pourcentage de concentré et de l'acidose ou de la supplémentation en levures et de l'acidose sur les paramètres zootechniques, le pH ruminal et la digestibilité de chèvres laitières en cases individuelles.

Matériels et méthodes

18 chèvres en milieu de lactation (dont 12 canulées), réparties en deux groupes, ont successivement reçu deux régimes plus ou moins riches en concentré (L : 20 % et H : 50 %). Tous les animaux ont d'abord reçu le régime L pendant 2 semaines, puis le régime H pendant 11 semaines, puis à nouveau le régime L pendant 3 semaines. La ration était distribuée deux fois par jour, dans les proportions d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi, conformément à l'intervalle de temps entre les traites. Après 3 semaines de régime H, la moitié des animaux a reçu quotidiennement 10 g de levures ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech) en deux apports égaux avant chaque distribution de ration.

Les animaux ont été pesés chaque semaine. Les quantités ingérées ont été mesurées quotidiennement et la production laitière, cinq jours par semaine. La composition du lait a été analysée une fois par semaine. Le pH ruminal a été mesuré toutes les minutes par une sonde intra-ruminale pour les animaux canulés. Un codage global des crises d'acidose utilisant les chutes successives d'au moins deux des paramètres pH, ingestion et production, et trois codages individuels (pH, ingestion et production), intégrant l'intensité des crises d'acidose, ont été réalisés.

Des mesures de digestibilités ont été effectuées, en cases à bilans, pendant trois des cinq semaines de la période de supplémentation en levures sur les six animaux non canulés.

Résultats

La distribution du régime H a diminué les quantités ingérées quotidiennes et a augmenté la quantité de lait produite par jour, mais la composition du lait n'a pas été influencée par le régime. Le pH moyen ruminal a eu tendance à être inférieur pour le régime H par rapport au régime L, mais le pH minimum n'a pas été influencé.

L'apport de levures a augmenté la production laitière brute des animaux sans modifier les quantités ingérées, et a diminué les taux butyreux et protéiques sans influencer la quantité de matière grasse ou de matière protéique produites. Le pH moyen ruminal n'a pas été modifié, mais le pH minimum a eu tendance à être inférieur pour les animaux supplémentés. Un effet rémanent de la supplémentation a été mis en évidence sur l'ingestion, la production laitière brute et corrigée, et le pH minimum.

Les crises d'acidose ont diminué l'ingestion, la production laitière et les valeurs moyennes et minimales du pH ruminal. Elles ont entraîné une baisse des quantités de matières grasse et protéique du lait, bien qu'ayant augmenté les taux butyreux et protéique.

Aucune influence de la supplémentation en levures n'a été observée sur la digestibilité de la matière sèche, de la matière organique, ou des fibres (NDF et ADF).

Discussion et conclusion

- Peu d'effets du régime ont été observés sur les paramètres zootechniques et le pH. Cependant, les deux régimes ont induit de l'acidose, même si le régime H a été plus acidogène que le L, ce qui peut expliquer le peu de différences observées entre les deux régimes.

- Les crises d'acidose ont eu une influence importante sur la majorité des paramètres testés, mais les résultats sont difficiles à interpréter. En effet, les codages par paramètre ont permis de représenter l'intensité des crises en prenant en compte les déviations brutales des paramètres mais n'ont pas permis de déterminer un effet global des épisodes d'acidose.

- L'effet de l'acidose a été plus important que les effets du régime ou des levures pour la plupart des paramètres, ce qui met en évidence l'importance d'avoir codé les crises d'acidose.

- Ce codage nous a permis d'éviter une confusion d'effets entre acidose et effets du régime ou des levures, ce qui pourrait expliquer la très forte variabilité observée dans la littérature, dans la mesure où aucune publication n'a été trouvée prenant en compte l'occurrence de ces crises.

Live yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation and acidosis in dairy goats receiving two diets of differing concentrate proportion. Influence on intake, production, ruminal pH and digestibility

Desnoyers M.^{1,2}, Duvaux-Ponter C.¹, Sauvant D.¹, Bertin G.² et Giger-Reverdin S.¹

¹*UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude Bernard 75005 Paris, France*

²*Alltech France, 14 place Marie-Jeanne Bassot 92593 Levallois-Perret cedex, France*

Running head

Yeast, acidosis and production in dairy goats

Soumis à Animal

Abstract

Acidosis is one of the major concerns of ruminant animal nutrition and adding yeast to the diets of ruminant animals may influence rumen fermentation and subsequently help the ruminal ecosystem deal with high concentrate diets. The aim of this study was to analyse simultaneously the effects of bouts of acidosis and yeast supplementation on intake, production, rumen pH and digestibility of organic matter and fibre in dairy goats offered two diets that differed in percentage of concentrate. Increasing concentrate percentage in the diet decreased dry matter intake (**DMI**), increased raw milk yield (**RMY**) when adjusted by DMI, and tended to decrease mean rumen pH. Yeast supplementation did not influence DMI, milk and protein production or mean rumen pH. A positive carry over effect of yeast supplementation was observed on RMY and fat corrected milk. Neither the digestibility of organic matter, NDF nor ADF was influenced by yeast supplementation. Bouts of acidosis were encoded for statistical analysis according to the intensity of the perturbation. They were seen to influence most of the parameters tested; DMI, RMY, fat corrected milk, milk fat and protein production, mean and minimum rumen pH were all decreased whereas milk fat and protein contents increased. Since acidosis has a more profound effect on a number of production based parameters than yeast, it is important to analyse data from live yeast studies very carefully allowing for the incidence of acidosis.

Key-words: acidosis, yeast, pH, digestibility, dairy goats

Introduction

Most dietary compounds entering the rumen are rapidly degraded by numerous anaerobic micro-organisms present in the rumen fluid. Thus, rumen metabolism plays a key role in how ruminant species respond to their diet and the addition of yeast to the rumen ecosystem might influence ruminal fermentation and help the rumen microbiota deal with the acidotic effects of high concentrate diets. Subacute ruminal acidosis (**SARA**) is one of the major consequences of feeding high concentrate diets to high producing ruminants (Martin *et al.*, 2006). It is often characterised by a mean rumen pH between 5.50 and 6.25 (Sauvant *et al.*, 2004) or by a minimum pH below 6.0 (Krehbiel *et al.*, 1995). The most consistent and immediate clinical sign of SARA is depressed or fluctuating feed intake (Oetzel, 2000) and off-feed periods (Tremere *et al.*, 1968). Milk production is also affected with drops in milk yield and milk fat content (Kawas *et al.*, 1991, Oetzel, 2000, Martin *et al.*, 2006). Supplementing the rumen with yeast has been seen to increase milk production (see reviews by Robinson, 2002, Stella *et al.*, 2007) and influence a number of rumen parameters such as pH, VFA concentration and total tract nutrient digestion (Erasmus *et al.*, 1992, Robinson, 2002). Results are however very inconsistent across studies and some quantitative reviews showed a significant effect of yeast supplementation on milk production in early lactation dairy cows (Ali-Haimoud-Lekhal *et al.*, 1999), but no influence of yeast supplementation were detected on milk production in late lactation dairy cows (Ali-Haimoud-Lekhal *et al.*, 1999) or on rumen fermentation characteristics (Sauvant *et al.*, 2004). However, a recent quantitative review showed positive effects of yeast supplementation on rumen fermentation and milk production, especially with high concentrate diets (Desnoyers *et al.*, unpublished data). Because the risk of bouts of acidosis and off-feed periods increases with the percentage of concentrate in the diet, the effects of acidosis can confound subsequent analysis of the effects of diet and yeast supplementation. Thus, such bouts have to be taken into consideration when analysing the effects of yeast supplementation on animal performance. The objectives of this study were two-fold; firstly to simultaneously analyse the effects of bouts of acidosis and dietary concentrate percentage and secondly to simultaneously analyse the effects of bouts of acidosis and yeast supplementation on intake and production parameters in dairy goats.

Table 1 Composition and analysis of the two experimental diets containing low (L) or high (H) concentrate proportion

diet	L	H
<i>Composition (% DM):</i>		
Concentrate ^a	20	50
Dehydrated lucerne hay	32	0
Grass hay	19	35
Sugarbeet pulp	29	15
Dry Matter (%)	54.8	63.0
Net Energy UFL /kg DM ^b	0.77	0.91
PDIN ^c g/kg DM	85	95
PDIE ^c g/kg DM	96	103
<i>Analysis (% DM)</i>		
NDF	39.9	34.7
ADF	21.4	15.9
ADL	4.0	1.8
OM	92.6	93.6
Starch	24.1	8.4

^a25% wheat, 25% barley, 30% maize, 15% soyabean meal, 3 % mineral premix (8-25-4) and 2 % molasses

^b calculated by taking into account the digestive interactions (Sauvant and Giger-Reverdin, 2007)

^c Calculated from the INRA Tables (Baumont et al., 2007)

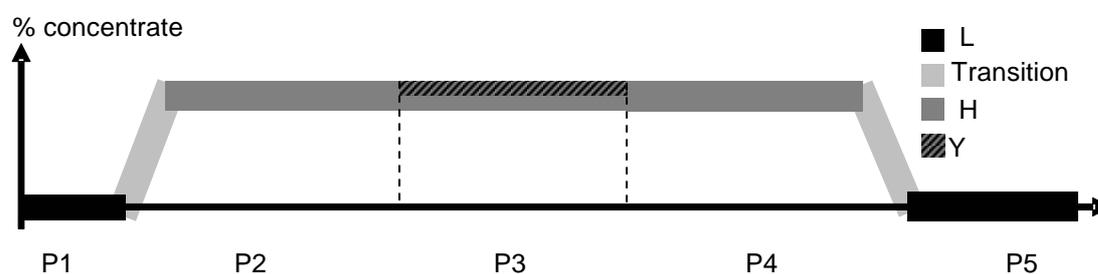


Fig. 1. Description of the experimental design followed by 12 dairy goats successively offered low (L, 20 %) or high (H, 50 %) concentrate diets. Experimental period P1 lasted two weeks, P2, P4 and P5 lasted 3 weeks, P3 lasted 5 weeks during which half of the goats (Y) received yeast daily.

Materials and methods

Animals and housing

The trial was conducted on 18 dairy goats (8 Saanen and 10 Alpine) in mid lactation (39 ± 4.1 days in milk at the start of the experiment), with mean body weight \pm standard deviation (**s.d.**) of 66 ± 7.5 kg, producing 3.8 ± 0.76 kg milk per day at the start of the experimental period and which had never been included in any previous study investigating acidosis. Twelve goats were rumen cannulated and the six others were used for digestibility measurements. The experiment was conducted under the guidelines given by the French Agriculture Ministry. The 18 goats were allocated into two groups according to previous milk yield, body weight (**BW**) after parturition, breed and feeding behaviour. The last criteria was taken into account by using the proportion of the daily feed eaten 100 min after the afternoon feeding which corresponds to the maximal between-goats variability. It was measured in the previous autumn. The two groups differed only by ruminal yeast supplementation. The yeast (**Y**) group received 10 g of dried live yeast daily ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech KY, one 5 g dose at each feeding) either via the rumen cannulae for cannulated goats or orally with a dosing gun for non cannulated animals. The control group (**C**) did not receive anything. Goats were kept in 2 m x 1 m individual pens during the whole experiment.

Experimental design and composition of the experimental diets

Experimental design was divided into five experimental periods (Figure 1). Animals started receiving the high (50 %) concentrate diet (**H**) following two weeks of housing adaptation (**P1**) to individual pens during which animals received a low (20 %) concentrate diet (**L**) and one further week of adaptation during which animals received a transition diet. Following three weeks of adaptation to diet H (**P2**), the Y group received daily yeast supplementation over the course of the next five weeks (**P3**). Following completion of the period of yeast supplementation, all animals continued receiving diet H for a further three weeks (**P4**). Following the completion of P4, all animals received a transition diet for a period of one week followed by three weeks of diet L (P5). Diet compositions are given in Table 1. Energy value of the diets was calculated according to the analytical method proposed by Vermorel (1988) and taking into account the digestive interactions due to both feeding level and concentrate percentage (Sauvant and Giger-Reverdin, 2007). Nitrogen values of the diets were calculated according to the additive method from the INRA tables (Baumont et al.,

2007). Analyses of dry matter (estimated from water content (ISO, 1983)), ash (ISO, 1978), crude protein (CP) (ISO, 1997) and starch (AFNOR, 1997) were performed on feedstuffs. Cell wall content was estimated by the method of Van Soest and Wine (1967) as modified by Giger et al. (1987). Lignocellulose (ADF) and lignin (ADL) were obtained using a sequential approach on the NDF residue (Giger *et al.*, 1987). Goats were fed *ad libitum* with a total mixed ration offered individually twice daily after milking, in the proportions of two thirds at 1600 h and one third at 0800 h according to the intervals between milkings. Quantities of feed offered were adjusted weekly for each individual animal to ensure 10 % refusals.

Weight and production measurements

Animals were weighed weekly. Offered and refused feeds were individually weighed daily and dry matter intake (**DMI**) calculated using dry matter percentage of the diet. Daily DMI per kilogram of body weight (**DMIBW**) was calculated using the BW of the previous week. Raw milk yield (**RMY**) was recorded 5 days out of 7. Milk fat and protein contents (**MFC** and **MPC**, respectively) were analyzed once a week on two successive milkings. Fat corrected milk (3.5 % **FCM**) and energy balance (**EB**) were calculated according to the formulas published by Sauviant *et al.* (2007).

Digestibility analyses on the six non cannulated goats

Digestibility trials were conducted on the six non cannulated goats, which were housed in digestibility crates (Giger and Hervieu, 1980). After a three-week period of adaptation, digestibility trials were performed during three separate weeks of P3. Offered and refused feeds and faeces were analysed, as previously described for feedstuffs, to calculate digestibility coefficients of dry matter, organic matter, NDF and ADL. The mean value of five consecutive days per goat were calculated and used in the statistical analyses.

Continuous measurements on the 12 cannulated goats

Starting one week before the beginning of the experiment each goat was accustomed to wearing a coat covering its back and maintained by individually adjusted elastic straps and a leather halter especially made for goats and also individually adjusted for each animal. Rumen pH was measured every minute by a self cleaning pH probe (accuracy = 0.01 pH, Fisher Bioblock Scientific, France) fitted in the rumen through the ruminal cannulae and linked to a portable device (Easy Log EL-2, Omega engineering. Inc, USA) (Brossard *et al.*, 2003) placed in one of the coat pockets. A 300 g weight was attached to each probe to reduce its

mobility in the rumen. Twice a week, pH probes were calibrated and the presence of the weight was checked. Data were downloaded every two or three days on a computer. Due to numerous technical problems for continuous recording of rumen pH, daily mean and minimum pH were calculated only for the days showing at least 21 h of measurements.

Encoding of bouts of acidosis for the 18 goats

Daily changes in DMIBW and RMY were used to detect off-feed periods that were related to bouts of acidosis. Firstly, days with a DMIBW or RMY not included in the interval mean $\pm 1.5 \times \text{s.d.}$ (both calculated for each goat) were selected. Secondly, days with a drop in DMIBW between two consecutive days greater than 10 g/kg BW were selected. Thirdly, days with a mean rumen pH lower than 6.0 were also selected. Finally, a goat was considered as experiencing a perturbation if at least two parameters out of pH, DMIBW and RMY were selected at the same time or during at least two consecutive days. The end of the bout was determined by the last selected day. Selected days were encoded "1" and other days "0". This encoding is called "global encoding" throughout the manuscript.

The intensity of the perturbation was also encoded for each goat and each day. For this purpose, a mean was calculated for each of the three parameters pH, DMIBW and RMY with all the values recorded for any individual goat. A general s.d. for each parameter was calculated with the values obtained from the 18 goats. Table 2 describes how the data were encoded. A last increment (+1) was added for DMIBW encoding for all the values lower than 8.33 g/kg BW (= 0.5 kg DMI for a goat weighing 60 kg). Therefore, the highest code which could be given was 6 for DMIBW encoding and 5 for pH and RMY and the lowest code was -5 for each of the three encodings. Positive values were chosen to encode values lower than the mean because bouts of acidosis usually lead to pH, DMIBW and RMY drops.

Statistical analyses

Only data from the second week of P1 were analyzed during P1 because the first week allowed for goat adaptation to individual pens. Transition weeks were not included in the analysis. When a goat lost its cannula, this day and the following day were excluded from the analysis, and each consecutive days data were discarded until at least 95 % of the previous DMIBW was reached. One observation for milk composition analysis was removed due to acute acidosis as the animal concerned presented extreme and aberrant values for milk composition (MFC = 101.8 g/kg and MPC = 44.0 g/kg). One goat from group Y group died

Table 2 Intervals used to define the specific encodings

Interval		
Lower limit	Upper limit	Encoding
$M^a + 3.0 \times \text{s.d.}^b$	∞	-5
$M + 2.5 \times \text{s.d.}$	$M + 3.0 \times \text{s.d.}$	-4
$M + 2.0 \times \text{s.d.}$	$M + 2.5 \times \text{s.d.}$	-3
$M + 1.5 \times \text{s.d.}$	$M + 2.0 \times \text{s.d.}$	-2
$M + 1.0 \times \text{s.d.}$	$M + 1.5 \times \text{s.d.}$	-1
$M - 1.0 \times \text{s.d.}$	$M + 1.0 \times \text{s.d.}$	0
$M - 1.5 \times \text{s.d.}$	$M - 1.0 \times \text{s.d.}$	1
$M - 2.0 \times \text{s.d.}$	$M - 1.5 \times \text{s.d.}$	2
$M - 2.5 \times \text{s.d.}$	$M - 2.0 \times \text{s.d.}$	3
$M - 3.0 \times \text{s.d.}$	$M - 2.5 \times \text{s.d.}$	4
∞	$M - 3.0 \times \text{s.d.}$	5

M^a : mean of the studied parameter calculated for a given goat

s.d^b : general standard deviation for the studied parameter

very shortly after the end of yeast supplementation period (beginning of P4) and data from this animal were subsequently discarded from the statistical analysis.

All the statistical analyses were carried out by a generalized linear model procedure using Minitab (Version 12.2, 1998, Minitab Inc.). They were performed with the same basic model including fixed effects of group and goat nested into the group, a covariate for time (day or week), a covariate for acidosis and the interaction between time and group, which was removed when non significant. The covariate for acidosis was represented by the value of the encoding corresponding to the studied variable. DMI encoding was used for BW analysis and global encoding for EB analysis. A covariate for diet was added to this basic model to analyse the effect of the diet during periods P1, P2, P4 and P5. The analysis of the effect of yeast was carried out in two steps. Firstly, a covariate for carry over effect was added to the basic model to test the carry over effect of yeast between periods P2 and P4. Secondly, if the carry over effect of yeast during P4 was not significant, the effect of yeast was tested, using a covariate added to the basic model, on periods P2, P3 and P4. Otherwise it was tested only on periods P2 and P3.

Effect of yeast supplementation on digestibility data was only tested during P3 and without testing the acidosis effect because only one goat experienced a bout of acidosis during the digestibility measurements. It was tested with a similar model including fixed effects of group and goat nested into the group, a covariate for time (day or week) and a covariate for yeast effect.

Results

Fifteen of the 18 goats had at least one incidence of acidosis. Table 3 shows the proportion of encoded days during each experimental period and for each of the four encodings (global, DMI, RMY and pH). The proportion of encoded days was greater with H compared to L, especially during P2 and P4. The lowest proportion of encoded days was observed during P5. During the period when goats were offered H, specific encodings showed a greater proportion of days encoded as “drops” (positive encoding) than of days encoded as “high values” (negative encoding), with the exception of pH encoding during P2 and DMI encoding during P3, while the opposite trend was observed when goats were offered L.

Table 3 Proportion of encoded days, during each experimental period, for the global encoding and the DMIBW, RMY and pH encodings.

	Global 0-1	DMI	RMY	pH
P1				
Range ^a		[- 1; + 3]	[- 2; 0]	[- 5; + 1]
> 0 (drops) ^b	4.7 %	7.1 %	0.0 %	4.1 %
< 0 (high values) ^c		4.7 %	19.6 %	45.8
P2				
Range		[- 2; + 6]	[- 3; + 5]	[- 5; + 4]
> 0 (drops)	23.2 %	13.9 %	9.2 %	7.3 %
< 0 (high values)		4.0 %	6.4 %	10.7 %
P3				
Range		[- 1; + 6]	[- 4; + 4]	[- 2; + 5]
> 0 (drops)	5.9 %	4.6 %	1.9 %	12.7 %
< 0 (high values)		1.5 %	4.9 %	6.7 %
P4				
Range		[- 2; + 5]	[- 1; + 3]	[- 2; + 2]
> 0 (drops)	13.6 %	8.5 %	6.7 %	8.0 %
< 0 (high values)		1.4 %	1.9 %	5.0 %
P5				
Range		[- 1; + 6]	[- 1; + 3]	[- 5; + 1]
> 0 (drops)	2.6 %	4.8 %	0.8 %	3.4 %
< 0 (high values)		13.8 %	16.4 %	29.3 %

^a Positive values represent drops in the corresponding parameter (assumed to be due to acidosis), negative values represent high values for the corresponding parameter

^b Range of variation for each encoding

^c Proportion of positive values for each encoding

^d Proportion of negative values for each encoding

Diet effect

Influence of diet is presented in Table 4. Feeding H decreased DMIBW ($P < 0.001$) and BW ($P = 0.02$) and tended to decrease mean rumen pH ($P = 0.06$). It had no influence on RMY, FCM, milk composition or minimum rumen pH ($P > 0.10$). When DMIBW was included as a covariate within the model, RMY increased when the goats were offered H compared to L (3.04 vs 3.10 for L and H, respectively; $P = 0.045$; $rmse = 0.298$). Energy balance was increased with H compared to L ($P = 0.009$). Bouts of acidosis influenced all parameters except BW and fat to protein ratio. Bouts of acidosis decreased DMIBW, RMY, FCM, milk fat and protein production, EB and mean and minimum rumen pH ($P < 0.001$ for all the parameters) although it was found to increase milk fat content ($P = 0.001$) and protein content ($P < 0.001$). When using the global encoding, residues of the analysis were seen not to be normally distributed, probably because a global encoding based simultaneously on pH, DMIBW and RMY drops was not able to reflect the intensity of the perturbations in these variables. The use of encodings that had been adapted with respect to the intensity of perturbations of intake, milk production and pH enabled to obtain normal distributions for the residues. For the highest encoding level of DMIBW (6; Table 4), the coefficient applied to the animals experiencing acidosis reached - 40.2 g/kg (= 6 x (- 6.7), Table 4), reflecting that some goats did not eat at all during a period of acidosis. The same was true for milk production, as the coefficient reached - 3.55 kg milk (= 5 x (- 0.71), Table 4), the highest level of encoding corresponding to extremely low milk production. The effect that bouts of acidosis had on mean rumen pH ranged from -1 to +1 pH unit.

Effect of Yeast

The effect of yeast and subsequent carry over effect of yeast supplementation are presented in Table 5. Yeast supplementation increased RMY ($P < 0.001$), decreased milk fat and protein content ($P = 0.02$ and $P < 0.001$, respectively) and tended to decrease minimum rumen pH ($P = 0.08$). Raw milk yield was also increased by yeast supplementation when DMIBW was included as a covariate within the model (3.04 vs 3.22 for non supplemented and supplemented goats, respectively, $P < 0.001$, $rmse = 0.29$). Yeast supplementation had no effect on BW, DMIBW, FCM, milk fat and protein production, fat to protein ratio, EB or mean rumen pH ($P > 0.1$). However, yeast supplementation had a positive carry over effect on BW ($P = 0.02$), RMY ($P < 0.001$), FCM ($P < 0.001$) and milk protein content ($P = 0.014$). It had a negative carry over effect on minimum rumen pH ($P = 0.01$) and tended to have a negative carry over effect on DMIBW ($P = 0.08$). Bouts of acidosis influenced all parameters

Table 4 Effects of feeding a low (L, 20 %) or high (H, 50 %) concentrate diet and of bouts of acidosis on body weight, intake, milk production, energy balance and rumen pH parameters

	n ^a	Diet			Acidosis		rmse
		L	H	<i>P</i>	Coef. ^b	<i>P</i>	
Body weight (kg)	108	65.5	63.7	*	- 0.32	NS	2.07
Dry matter intake (g/kg BW)	942	42.0	40.6	***	- 6.7	***	3.48
Raw milk yield (kg/day)	634	3.58	3.61	NS	- 0.71	***	0.315
Fat corrected milk (kg/day) ^c	634	4.14	4.09	NS	- 0.67	***	0.353
Milk fat content (%)	119	5.4	5.2	NS	+ 0.31	**	0.48
Milk protein content (%)	119	3.4	3.5	NS	+ 0.18	***	0.17
Milk fat (g/day)	119	181	179	NS	- 21.9	***	17.7
Milk protein (g/day)	119	120	124	NS	- 21.5	***	10.6
Milk fat/protein ratio	124	1.57	1.52	NS	+ 0.02	NS	0.151
Energy balance(UFL/day)	119	-0.24	0.02	**	- 0.54	***	0.308
Mean rumen pH	331	6.16	6.12	†	- 0.20	***	0.114
Minimum rumen pH	290	5.32	5.37	NS	- 0.25	***	0.247

^a number of observations

^b estimated coefficient of the covariable Acidosis

^c 3.5 % fat corrected milk

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

except BW and fat to protein ratio. Incidences of acidosis were seen to decrease DMIBW, RMY, FCM, milk fat and protein production, EB and mean and minimum rumen pH ($P < 0.001$ for all parameters). Conversely they were seen to increase milk fat and protein content ($P < 0.001$). Yeast supplementation had no effect on digestibility of dry matter (67.7 ± 0.45 and 68.42 ± 0.45 , for C and Y groups respectively; $P > 0.1$), organic matter (70.1 ± 0.49 and 70.5 ± 0.49 , for C and Y groups respectively; $P > 0.1$), NDF (54.3 ± 0.87 and 55.6 ± 0.87 , for C and Y groups respectively; $P > 0.1$) or ADF (45.8 ± 1.21 and 46.8 ± 1.21 , for C and Y groups respectively; $P > 0.1$). Diet organic matter digestibility (**OMd**) calculated from INRA tables (Baumont *et al.*, 2007) was 81.1 %. However, when digestive interactions were taken into account, as proposed by Sauvant and Giger-Reverdin (2007), the calculated OMd became 70.3 %, which is in accordance with OMd calculated from the equation based on analytical data obtained in dairy goats (71.6 %) (Giger *et al.*, 1986).

Discussion

Mean ruminal pH of 6.25 was determined as the threshold pH for the definition of SARA (Sauvant *et al.*, 1999). According to this definition, both diets induced SARA which was not expected. However, it is reasonable to suggest that H tended to induce more incidences of SARA than L. This result may reflect the high percentage of sugarbeet pulp in L (29 %) and of grass hay (35 %) in H. Sugarbeet pulp is rich in pectin and is quickly degraded in the rumen (Tamminga *et al.*, 1990), whilst grass hay can limit the occurrence of SARA. Since the effects of bouts of acidosis were taken into account in the present analysis, these results might also indicate that the lower mean rumen pH often described in the literature concerning the use of high concentrate diets may only be due to drops in pH due to the incidence of acidosis. Therefore, animals offered high concentrate diets and which are not experiencing acidosis may not necessarily have a lower mean rumen pH than goats offered more fibrous diets. The decrease in DMI observed when goats were offered H compared to L is neither in accordance with the results obtained in goats by Kawas *et al.* (1991) or in cattle by Manson and Leaver (1988) who reported an increase in DMI as concentrate percentage increased within the diet, nor with the results of Maekawa *et al.* (2002) who reported that percentage of concentrate within the diet did not affect DMI in dairy cow. The reason for this discrepancy between this study results and those of other studies might be due to the high energy content of H; Montgomery and Baumgardt (1965a, 1965b) observed that when the energy value of the diet increases above a certain level, DMI of the animal decreases whilst energy intake remains

Table 5 Carry over effect of yeast supplementation, effects of yeast supplementation and of bouts of acidosis on body weight, intake, milk production, energy balance and rumen pH parameters

	n ^a	Carry over		Yeast			Acidosis		rmse
		coef	P	C	Y	P	Coef.	P	
Body weight (kg)	138 (92)	+ 7.5	*	64.6	65.1	NS	- 0.14	NS	1.66
Dry matter intake (g/kg BW)	1009 (647)	- 1.0	†	41.1	41.5	NS	- 6.9	***	3.33
Raw milk yield (kg/day)	720 (461)	+ 0.22	***	3.59	3.77	***	- 0.68	***	0.302
Fat corrected milk (kg/day) ^c	715 (460)	+ 0.28	***	4.07	4.11	NS	- 0.64	***	0.351
Milk fat content (%)	184 (90)	- 0.00	NS	5.2	4.9	*	+ 0.32	***	0.51
Milk protein content (%)	184 (90)	+ 0.09	NS	3.4	3.2	***	+ 0.28	***	0.15
Milk fat (g/day)	184 (90)	+ 11.8	NS	179	176	NS	- 21.6	***	19.8
Milk protein (g/day)	184 (90)	4.5	NS	122	121	NS	- 18.4	***	11.3
Milk fat/protein ratio	184 (90)	- 0.03	NS	1.53	1.51	NS	0.00	NS	0.155
Energy balance(UFL/day)	184 (90)	- 0.01	NS	0.01	0.05	NS	- 0.39	***	0.257
Mean rumen pH	383 (249)	+ 0.01	NS	6.16	6.14	NS	- 0.22	***	0.109
Minimum rumen pH	247 (230)	- 0.56	*	5.47	5.31	†	- 0.25	***	0.210

^a number of observations for yeast effect analyses (for carry over effect)

^b estimated coefficient of the covariable Acidosis

^c 3.5 % fat corrected milk

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

constant. This indicates that regulation of intake changes from physical to metabolic control depending on the energy value of the diet. The greater theoretical OMD of the diet calculated from the INRA tables (Baumont *et al.*, 2007) compared to the OMD measured in the present study, and the correlation observed between this value and the theoretical value calculated using digestive interactions (Sauvant and Giger-Reverdin, 2007) confirms that digestive interactions have to be taken into account when estimating the energy value of high concentrate diets.

Milk production and composition were not influenced by diet but RMY was increased by H compared to L only when DMIBW was included in the model. Thus, goats offered H actually produced more milk per kilogram of DMI when compared to L. This is in accordance with Manson and Leaver (1988) showing that high concentrate diets increase milk production, because they are of higher energy value. This is certainly due to the positive EB observed when goats were offered H and to the negative EB observed when goats were offered L. Increasing the percentage of dietary concentrate has also been shown to decrease milk fat content (Manson and Leaver, 1988, Kawas *et al.*, 1991, Maekawa *et al.*, 2002) although this observation was not present in the current study. These conflicting observations with the literature for both DMI and milk production might be due to the high frequency of acidotic perturbations observed in the current study. It was noted on the same goats and during the same study that after a bout of acidosis it required in excess of 20 days for intake and production to reach mean values observed prior to the onset of the perturbation. (Desnoyers *et al.*, unpublished data). The days corresponding to a slow recovery from a bout of acidosis were not encoded as “acidosis” in the present analysis because the values were higher than mean - s.d.. However, these relatively low values which are still a consequence of a bout of acidosis may have affected results. Furthermore, the specific analysis of bouts of acidosis occurring during this experiment (Desnoyers *et al.*, unpublished data) showed that milk fat content was increased during bouts of acidosis due to a concentration phenomenon and lipomobilization. Thus a decrease in MFC in response to increases in the proportion of concentrate in the diet might have been confounded by the associative affect of increased MFC due to a bout of acidosis. Indeed, the method of encoding that was employed in this current study was not able to account for the fact that there might be a delay between an observed modification in milk yield (encoded as acidosis) and modification of milk composition. This lack of effect on milk composition might also be related to the very small differences observed on rumen pH, and to the fact that both diets seemed to have induced some degree of sub-clinical acidosis.

There are a number of studies reporting on the effect of yeast supplementation on lactating ruminants but very few studies have been reported in dairy goats. In this current experiment, the increase in RMY of supplemented goats when compared to controls is in accordance with results obtained in goats and cattle (Robinson, 2002, Stella *et al.*, 2007). However, these studies also reported an increase in DMI which was not observed in this current study. Results reported in the literature are however inconsistent and some experiments did not report any increase in intake or milk production (Wohlt *et al.*, 1998, Salama *et al.*, 2002). In the present experiment the decrease in MFC and MPC was certainly due to increases in RMY and the subsequent dilution of fat and protein in the milk, as no influence of yeast supplementation was observed on the daily production of fat or protein. Effects of yeast supplementation on milk composition are also variable within the literature; some authors reported increases in both milk fat and protein content (Watkins, 1993) whereas others did not report any effect of yeast supplementation on milk composition (Kung *et al.*, 1997, Wohlt *et al.*, 1998, Salama *et al.*, 2002). Decreases in MPC or MFC were very rarely described (Robinson, 2002, Stella *et al.*, 2007), however non-positive or non-significant results might be published less than positive findings. For both groups, the mean pH values were below the threshold of SARA determined by Sauvant *et al.* (1999), moreover no effects of yeast supplementation on rumen pH were observed. However, there was a tendency towards a lower minimum rumen pH in supplemented goats compared to control goats. These results are quite surprising since yeast supplementation is known and recommended to limit decreases in rumen pH of animals fed high concentrate diets. However this decrease in minimum rumen pH was only a tendency and further work is needed to confirm this result. A few authors have reported decreases in rumen pH that have accompanied yeast supplementation in steers and mid lactation dairy cows (Mutsvangwa *et al.*, 1992, Piva *et al.*, 1993) whilst a larger number of trials reported an increase in rumen pH (see review by Robinson, 2002) or no effect of yeast on ruminal pH (Quinonez *et al.*, 1988, Yoon and Stern, 1996). However, non-positive or non-significant results again may be less likely to be published than positive ones. Analysis of the sorting behaviour of goats in the current study (data not presented) showed that supplemented goats sorted their feed and therefore ingested a less fibrous diet than the diet initially offered. Conversely control goats ate a diet with a proportion of fibre similar to the offered one. This result probably explains the lower minimum rumen pH observed during yeast supplementation and an analysis taking into account the actual percentage of concentrate eaten might have showed differing results. The absence of any effect of yeast supplementation on digestibilities is in agreement with the findings of Putnam *et al.* (1997), although some

studies have shown a positive effect of yeast supplementation on organic matter digestibility (Yoon and Stern, 1996), NDF (Abd El-Ghani, 2004) and ADF digestibility (Wohlt *et al.*, 1998) as did the meta-analysis performed by the authors (Desnoyers *et al.*, unpublished data).

The decrease in DMI observed for the Y group after the end of yeast supplementation has to be confirmed since it was only a tendency. Only Wohlt *et al.* (1998) reported carry over effects of yeast and observed that yeast removal from the diet after parturition decreased DMI and peak milk yield in dairy cows. In the current study yeast supplementation seemed to have enhanced milk production on a long term basis as the RMY and FCM of supplemented goats increased when compared to controls following completion of the supplementation period. The positive carry over effect of yeast supplementation on FCM is quite surprising given the lack of any carry over effect of yeast supplementation on milk composition. However, the primary effect of yeast supplementation might thus be to increase RMY without influencing any milk component synthesis. Then a greater time might be necessary to observe an increase in FCM. More research is needed to confirm this hypothesis. No carry over effect of yeast was observed on mean rumen pH but minimum pH decreased after the end of yeast supplementation. Live yeasts disappear from the rumen within three days following cessation of supplementation (Desnoyers *et al.*, 2007). Consequently any carry over effects is not due to yeasts still living in the rumen. However, the rumen ecosystem might have been modified by yeast supplementation and might have been destabilized after yeast removal. It takes a few weeks for the rumen ecosystem to adapt to a change in the diet (see review by Kleen *et al.*, 2003) and it takes a number of weeks to adapt to yeast supplementation. Thus, the lack of effect of yeast during the five weeks of supplementation might be due to this adaptation time and a more complete analysis after the end of the supplementation period might confirm this hypothesis.

Bouts of acidosis influenced almost all measured parameters with the exception of BW and fat to protein ratio. The same effects of acidosis were observed between analyses performed on diet or yeast. The effects of acidosis on pH, DMI and RMY confirm the relevance of the encoding. The decrease in total milk fat and protein is in accordance with the decrease in RMY and in FCM. However, the increase in MFC and MPC is certainly due to the drop in RMY, which is greater than the drop in milk fat and protein production, and which induced a change in the concentration of milk components. The separate encoding of bouts of acidosis for DMI, milk production and pH instead of a global encoding of bouts of acidosis did not allow a true representation of the influence of the whole bout of acidosis on these respective parameters. Furthermore, this encoding did not take into consideration the delay

between successive perturbations of pH, intake and production or between milk production and milk parameters, which might have influenced the results. However, the chosen encoding seemed to be the most suitable among all other encodings tested. Even so, another encoding system may have been as suitable and may have marginally adjusted results but without changing the main conclusions. Encoding made it possible to avoid confounding effects between perturbations, as a result of acidosis, and the tested experimental parameters. These bouts of acidosis induced more of an effect than those of yeast supplementation or diet composition on all parameters measured. This result indicates that the analysis of the effects of yeast supplementation, diet or any other experimental parameter measured in studies using high concentrate diets may not be reliable if bouts of acidosis are not taken into account. Furthermore, the prominent effect of acidosis on measured parameters when compared to those of diet or yeast supplementation might partly explain the high variability observed in the literature in experiments using high concentrate diets, and in studies where high yielding ruminants are fed high concentrate diets. Thus analysing data that simply contains only yeast or diet as study effects without regard for bouts of acidosis may lead to conflicting or misleading effects.

Conclusion

Increasing the proportion of concentrate in the diet induced a small number of modifications, mainly a decrease in DMI and an increase in RMY. Yeast supplementation increased RMY without increasing milk fat or protein production, which subsequently resulted in a decrease in MFC and MPC. Furthermore, a positive carry over effect of yeast supplementation was observed for RMY and FCM. Very little effect of yeast was observed on rumen pH. This experiment showed that the effects of bouts of acidosis on intake, production parameters and pH were far more important than the effects of yeast supplementation or percentage of concentrate in the diet alone. These results indicate that experiments dealing with high concentrate diets have to be analysed very carefully and include adjustments for bouts of acidosis. This might furthermore explain the high variability observed between a number of studies using high concentrate diets that may have induced acidosis but were not compensated for in the final analysis of study data.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge Alltech Inc. (Lexington, KY) for their financial support to this project, A. Aymard, G. Chevallier, O. Dhumez, G. Durandet, M. Langot, P. Piquerel, A. Severin, and J. Tessier for their technical assistance during the experiment and Dr. D. Juniper for rereading the manuscript.

References

- Abd El-Ghani AA 2004. Influence of diet supplementation with yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on performance of Zaraibi goats. *Small Ruminant Research* 52, 223-229.
- AFNOR 1997. Aliments des animaux. Dosage de l'amidon. Méthode enzymatique. V18-121. p.9.
- Ali-Haimoud-Lekhal D, Lescoat P, Bayourthe C and Moncoulon R 1999. Effets de *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus oryzae* sur les performances zootechniques chez la vache laitière : étude bibliographique. In 6^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, p. 157.
- Baumont R, Dulphy JP, Sauvant D, Tran G, Meschy F, Aufrère J, Peyraud JL and Champciaux P 2007. Les tables de la valeur des aliments. In Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux-Valeurs des aliments. Tables INRA 2007 (ed. Quae), pp. 181-286, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris, France.
- Brossard L, Fabre M, Martin C and Michalet-Doreau B 2003. Validation of continuous ruminal pH measurements by indwelling probes (poster). In Conference of Gastrointestinal Function, Chicago, p. 25.
- Desnoyers M, Giger-Reverdin S, Duvaux-Ponter C and Bertin G 2007. Kinetics of appearance, disappearance and survival of Yea-Sacc^{®1026} (*Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) in the rumen and feces of dairy goats fed a high concentrate diet. In Alltech's 23rd annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, Kentucky, USA, p. 60.
- Erasmus LJ, Botha PM and Kistner A 1992. Effect of yeast culture supplement on production, rumen fermentation, and duodenal nitrogen flow in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 75, 3056-3065.
- Giger S and Hervieu J 1980. Conception d'une cage à bilan adaptée à la chèvre en lactation. *Annales de Zootechnie* 29, 55-64.

- Giger S, Sauvant D, Hervieu J and Dorléans M 1986. Etude de la prévision de la digestibilité des rations mixtes distribuées à des chèvres laitières par ses caractéristiques analytiques. *Annales de Zootechnie* 35, 137-160.
- Giger S, Thivend P, Sauvant D, Dorléans M and Journaix P 1987. Etude de l'influence préalable de différents traitements amylolytiques sur la teneur en résidu NDF d'aliments du bétail. *Annales de Zootechnie* 36, 39-48.
- ISO 1978. Animal Feedingstuffs. Determination of crude ash. ISO 5984. p.6.
- ISO 1983. Animal Feedingstuffs. Determination of moisture and other volatile matter content. ISO 6496. p.10.
- ISO 1997. Aliments des animaux. Détermination de la teneur en azote et calcul de la teneur en protéines brutes. Méthode Kjeldahl. ISO 5983. p.9.
- Kawas JR, Lopes J, Danelon DL and Lu CD 1991. Influence of forage-to-concentrate ratio on intake, digestibility, chewing and milk production of dairy goats. *Small Ruminant Research* 4, 11-18.
- Kleen JL, Hooijer GA, Rehage J and Noordhuizen JPTM 2003. Subacute ruminal acidosis (SARA): a review. *Journal of Veterinary Medicine - Series A*. 50, 406-414.
- Krehbiel CR, Stock RA, Herold DW, Shain DH, Ham GA and Carulla JE 1995. Feeding wet corn gluten feed to reduce subacute acidosis in cattle. *Journal of Animal Science* 73, 2931-2939.
- Kung L, Kreck EM, Tung RS, Hession AO, Sheperd AC, Cohen MA, Swain HE and Leedle JAZ 1997. Effects of a live yeast culture and enzymes on *in vitro* ruminal fermentation and milk production of dairy cows. *Journal of Dairy Science* 80, 2045-2051.
- Maekawa M, Beauchemin KA and Christensen DA 2002. Effect of concentrate level and feeding management on chewing activities, saliva production, and ruminal pH of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 85, 1165-1175.
- Manson FJ and Leaver JD 1988. The influence of concentrate amount on locomotion and clinical lameness in dairy cattle. *Animal Production* 47, 185-190.
- Martin C, Brossard L and Doreau M 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *Productions Animales* 19, 93-108.
- Montgomery MJ and Baumgardt BR 1965a. Regulation of food intake in ruminants. 2. Rations varying in energy concentration and physical form. *Journal of Dairy Science* 48, 1623-1628.

- Montgomery MJ and Baumgardt BR 1965b. Regulation of food intake in ruminants. 1. Pelleted Rations Varying in Energy Concentration. *Journal of Dairy Science* 48, 569-574.
- Mutsvangwa T, Edwards IE, Topps JH and Paterson GFM 1992. The effect of dietary inclusion of yeast culture (Yea-Sacc) on patterns of rumen fermentation, food intake and growth of intensively fed bulls. *Animal Production* 55, 35-40.
- Oetzel GR 2000. Clinical aspects of ruminal acidosis in dairy cattle. In 33rd Annual Conference, American Association of Bovine Practitioners, Rapid City, South Dakota, Usa, p. 14 pages.
- Piva G, Belladonna S, Fusconi G and Sicbaldi F 1993. Effects of yeast on dairy cow performance, ruminal fermentation, blood components, and milk manufacturing properties. *Journal of Dairy Science* 76, 2717-2722.
- Putnam DE, Schwab CG, Socha MT, Whitehouse NL, Kierstead NA and Garthwaite BD 1997. Effect of yeast culture in the diets of early lactation dairy cows on ruminal fermentation and passage of nitrogen fractions and amino acids to the small intestine. *Journal of Dairy Science* 80, 374-384.
- Quinonez JA, Bush LJ, Nalsen T and Adams GD 1988. Effect of yeast culture on intake and production of dairy cows fed high wheat rations. In, pp. 227-232. *Animal Science Research Report*. Agricultural Experiment Station, Oklahoma State University.
- Robinson PH 2002. Yeast products for growing and lactating dairy cattle: impacts on rumen fermentation and performance. In XII International Meeting on milk and meat production in hot climates, Mexicali, Mexico, p. 12 p.
- Salama AAK, Caja G, Garin D, Albanell E, Such X and Casals R 2002. Effects of adding a mixture of malate and yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on milk production of Murciano-Granadina dairy goats. *Animal Research* 51, 295-303.
- Sauvant D and Giger-Reverdin S 2007. Empirical modelling by meta-analysis of digestive interactions and CH₄ production in ruminants. In ISEP. Energy and Protein Metabolism and Nutrition, pp. 561-562.
- Sauvant D, Meschy F and Mertens D 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *Productions Animales* 12, 49-60.
- Sauvant D, Giger-Reverdin S and Schmidely P 2004. Rumen acidosis: modeling ruminant response to yeast culture. In Alltech's 20th Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry. Re-imagining the feed industry (eds. TP Lyons and KA Jacques), pp. 221-229, Nottingham University Press.

- Stella AV, Paratte R, Valnegri L, Cigalino G, Soncini G, Chevaux E, Dell'Orto V and Savoini G 2007. Effect of administration of live *Saccharomyces cerevisiae* on milk production, milk composition, blood metabolites, and faecal flora in early lactating dairy goats. *Small Ruminant Research* 67, 7-13.
- Tamminga S, van Vuuren AM, Koelen CJvd, Ketelaar RS and Togt PLvd 1990. Ruminal behaviour of structural carbohydrates, non-structural carbohydrates and crude protein from concentrate ingredients in dairy cows. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38, 513-526.
- Tremere AW, Merrill WG and Loosli JK 1968. Adaptation to high concentrate feeding as related to acidosis and digestive disturbances in dairy heifers. *Journal of Dairy Science* 51, 1065-1072.
- Van Soest PJ and Wine RH 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 50, 50-55.
- Vermorel M 1988. 3. Nutrition énergétique. In *Alimentation des bovins, ovins et caprins* (ed. R Jarrige), pp. 57-74, Institut National de la Recherche Agronomique, Paris France.
- Watkins RM 1993. Are yeast cultures effective in dairy goat feeds? *Feed Management* 44, 7-13.
- Wohlt JE, Corcione TT and Zajac PK 1998. Effect of yeast on feed intake and performance of cows fed diets based on corn silage during early lactation. *Journal of Dairy Science* 81, 1345-1352.
- Yoon IK and Stern MD 1996. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* cultures on ruminal fermentation in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 79, 411-417.

2. Supplémentation en levures vivantes chez des chèvres laitières. Influence sur les paramètres ruminiaux et sanguins

L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration de ruminants peut entraîner de l'acidose sub-clinique et une perturbation des fermentations ruminales. L'apport de levures pourrait permettre de limiter les variations des paramètres physico-chimiques du rumen et d'augmenter la production des animaux recevant des régimes riches en concentré.

Objectif

→ Analyser l'influence d'une supplémentation en levures sur les paramètres ruminiaux et sanguins de chèvres laitières en cases individuelles.

Matériels et méthodes

12 chèvres canulées, en milieu de lactation, réparties en deux groupes, ont reçu pendant 11 semaines un régime riche en concentré (50 %). La ration était distribuée deux fois par jour dans les proportions d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi, conformément à l'intervalle de temps entre les traites. Après trois semaines de ce régime, six animaux ont reçu quotidiennement 10 g de levures ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech) en deux apports égaux avant chaque distribution de ration. Les quantités ingérées ont été mesurées quotidiennement et la production laitière, cinq jours par semaine. Le pH ruminal a été enregistré toutes les minutes par une sonde intra-ruminale.

Quatre cinétiques postprandiales ont été réalisées avec 5 temps de prélèvement (T0 avant la distribution du matin, puis 1, 2, 4 et 6 h après). Chaque prélèvement consistait, premièrement, en un prélèvement de jus de rumen pour une analyse immédiate du pH, du pouvoir tampon, du potentiel rédox et une analyse ultérieure de la pression osmotique et des concentrations en ammoniacque, en acides gras volatils (totaux et de C2 à C6) et en acide lactique, deuxièmement, en une prise de sang pour analyse immédiate du pH et de la teneur en bicarbonates et finalement, en une seconde prise de sang pour analyse ultérieure, sur le plasma, de la pression osmotique, de la glycémie, de l'urémie et des teneurs en acides gras non estérifiés, en bêta-hydroxybutyrate, en albumine et en acide lactique.

Deux ACP ont été réalisées sur les paramètres ruminiaux et sur les paramètres ruminiaux et sanguins, respectivement, avec les cinq temps de prélèvements. Les analyses statistiques concernant l'effet des levures ont été réalisées sur la moyenne des valeurs mesurées 2 et 4 h

après la distribution, sauf pour l'acide lactique ruminal, pour lequel l'analyse a été réalisée sur la valeur mesurée 1 h après la distribution.

Résultats

La première ACP a montré que les fermentations ruminales ont évolué suite à la distribution de la ration d'une manière cohérente avec la littérature. Les temps de mesure 2 et 4 h après la distribution sont très proches, ce qui justifie de les moyenner pour l'analyse statistique.

La seconde ACP a confirmé l'évolution postprandiale des paramètres ruminiaux et a mis en évidence une évolution des paramètres sanguins, même si elle est de moindre importance que celle des paramètres ruminiaux.

L'apport de levures a augmenté la pression osmotique ruminale, la proportion d'isobutyrate et de valérate dans le rumen ainsi que la teneur en bicarbonates sanguins.

Discussion et conclusion

- La supplémentation en levures a influencé peu de paramètres ruminiaux et sanguins, mais cette influence était encore perceptible trois semaines après l'arrêt de la supplémentation, ce qui suggère une modification à long terme de l'écosystème ruminal.
- La variabilité inter-individuelle, représentée dans le plan 1-2 des ACP, n'a pas permis de déterminer de facteur(s) responsable(s) de la différence de susceptibilité des animaux à l'acidose.

**Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres laitières
recevant deux régimes différant par leur pourcentage de concentré.
Influence sur les paramètres ruminiaux et sanguins**

Desnoyers M.^{1,2}, Duvaux-Ponter C.¹, Sauvant D.¹, Bertin G.² et Giger-Reverdin S.¹

¹*UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude
Bernard 75005 Paris, France*

²Alltech France, 14 place Marie-Jeanne Bassot 92593 Levallois-Perret cedex, France

Introduction

Des chutes d'ingestion et de l'acidose ont été observées depuis longtemps dans les élevages intensifs de ruminants (Uhart et Carroll, 1967 ; Tremere *et al.*, 1968). L'acidose résulte le plus souvent de la distribution de rations riches en énergie et représente une mauvaise adaptation du rumen à leur ingestion (Uhart et Carroll, 1967 ; Tremere *et al.*, 1968 ; Kleen *et al.*, 2003), car les ruminants sont des animaux fondamentalement adaptés à la valorisation de fourrages plutôt que de concentrés.

La supplémentation en levures est généralement préconisée pour augmenter l'ingestion et la digestibilité de la ration, et donc la production laitière (revues par Robinson, 2002 ; Abd El-Ghani, 2004 ; Stella *et al.*, 2007). En effet, l'apport de levures pourrait influencer un certain nombre de paramètres ruminiaux en limitant la chute du pH ou l'augmentation de la concentration en Acides Gras Volatils (AGV) et en ammoniacque (Erasmus *et al.*, 1992). Les résultats sont cependant variables selon les expériences et des revues quantitatives de la littérature n'ont pas montré d'influence significative de la supplémentation en levures sur la production laitière (Ali-Haimoud-Lekhal *et al.*, 1999) ou sur les paramètres caractérisant l'état du rumen (Lescoat *et al.*, 2000 ; Sauvant *et al.*, 2004). En revanche, la méta-analyse présentée dans cette thèse a montré que les levures augmentaient la digestibilité de la matière organique, le pH ruminal et la concentration en AGV, mais diminuaient la concentration en acide lactique ruminal (Desnoyers *et al.*, 2008).

L'objectif de cette étude était d'analyser l'effet d'une supplémentation en levures, puis de l'arrêt de cette supplémentation, sur des paramètres ruminiaux et sanguins chez des chèvres en lactation recevant un régime riche en concentré.

Matériels et méthodes

Animaux et installations

Douze chèvres laitières canulées du rumen (4 Saanen et 8 Alpines) en milieu de lactation ($52 \pm 4,0$ jours de lactation en début d'expérience) et n'ayant jamais reçu de régime acidogène dans le cadre d'une expérimentation précédente ont été utilisées. En début d'expérience, elles pesaient $62 \pm 6,8$ kg de poids vif et produisaient $3,5 \pm 0,51$ kg. Ces chèvres ont été réparties en deux lots selon leur poids vif, leur production laitière de l'année précédente, leur race et leur comportement alimentaire, mesuré l'automne précédent par la quantité ingérée 100 min

après la distribution (maximum de variabilité observée). Elles ont été placées en cases individuelles de 2 m x 1 m sur caillebotis pendant toute la durée de l'expérience. Ces cases possédaient un abreuvoir pour deux cases. L'expérimentation a débuté après deux semaines d'habituation au dispositif expérimental. Les animaux étaient alimentés *ad libitum*. La nourriture était distribuée individuellement deux fois par jour, après chaque traite, dans des proportions d'un tiers le matin (8 h) et deux tiers l'après midi (16 h), conformément à l'intervalle entre les traites. Les quantités distribuées étaient adaptées à chaque animal et réajustées chaque semaine afin d'atteindre environ 10 % de refus chaque jour.

Le régime a été distribué sous forme de ration complète. Sa composition est présentée dans le Tableau 1. Les animaux ont reçu ce régime pendant 11 semaines, découpées en trois sous-périodes : P2, 3 semaines ; P3, 5 semaines pendant lesquelles le lot levure (Y) a reçu 10 grammes de levures ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech), via la canule ruminale en 2 apports quotidiens de 5 g avant chaque distribution de ration, le lot témoin (C) ne recevait rien ; et P4, 3 semaines. Les animaux ont disposé d'une pierre à lécher pendant toute l'expérience.

Ingestion, poids vif et production

Les animaux étaient pesés chaque semaine. Les quantités distribuées et les refus étaient pesés chaque jour avant le repas du soir, afin de calculer la MSI quotidienne à partir de la quantité de refus laissée quotidiennement et du pourcentage de matière sèche de la ration mesuré chaque semaine. La production laitière était enregistrée cinq jours par semaine.

Détection des crises d'acidose

Les crises d'acidose ont été essentiellement déterminées par les variations journalières d'ingestion et de production laitière. Premièrement, pour chaque chèvre, les jours présentant une MSIPV ou une PLB inférieure à la valeur moyenne - 1,5* écart-type (calculés pour chaque chèvre et chaque période) ont été sélectionnés. Deuxièmement, les jours présentant une chute de MSIPV supérieure à 10 g / kg PV ont également été sélectionnés. Troisièmement, les jours présentant un pH moyen ruminal inférieur à 6,0 ont également été sélectionnés. Finalement, une chèvre a été déclarée en crise d'acidose si au moins deux des paramètres parmi le pH, la MSIPV et la production étaient sélectionnés simultanément ou successivement pendant au moins deux jours consécutifs. La fin de la crise était déterminée par la fin des

Tableau 1. Composition et analyse du régime expérimental.

	régime
<i>Composition (% MS) :</i>	
Foin de prairie	35
Pulpe de betterave	15
Concentré ^a	50
Matière sèche (%)	63
Energie nette UFL/ kg MS	0,91
PDIN g/kg MS	95
PDIE g/kg MS	103
<i>Analyse (% MS)</i>	
NDF	34,7
ADF	15,9
ADL	1,8
MO	93,6

^a25% blé, 25% orge, 30% maïs, 15% tourteau de soja, 3 % complément minéral et vitaminé et 2% de mélasse.

jours repérés. Les jours représentant les crises d'acidose ont été codés « 1 », les autres jours « 0 ».

Cinétiques postprandiales

Quatre cinétiques ont été réalisées sur chacune des 12 chèvres. Une cinétique a été effectuée en fin de chaque sous-période P2, P3 et P4, et une cinétique supplémentaire a été réalisée pendant la sous-période P3, après trois semaines de supplémentation en levures. Pour chaque cinétique, des prélèvements ont été effectués avant la distribution de la ration du matin (T0) puis 1, 2, 4 et 6 h après (T1, T2, T4 et T6, respectivement).

Chaque point de cinétique comportait :

- Un prélèvement de jus de rumen (environ 100 ml, filtré sur une toile de nylon). Une partie des analyses a été faite immédiatement sur des fractions aliquotes sans conservateur :

- le pH (**pHR**)
- le pouvoir tampon (mesuré par ajout d'acide acétique 2N, suivant la méthode décrite par Giger-Reverdin *et al.*, 2000) (**tampon**)
- le potentiel d'oxydo-réduction (**redox**) (valeur d'équilibre après 30 min). Les valeurs sont exprimées en utilisant une électrode redox combinée au Calomel comme électrode de référence (System Industrie, Bourg Saint Andéol, France)

Les autres analyses ont été faites ultérieurement sur des échantillons conservés à – 20°C après ajout éventuel de conservateurs :

- l'ammoniaque (**NH₃**) a été déterminé par la méthode colorimétrique de Weatherburn (1967) sur des échantillons conservés avec du TCA (1 ml de TCA à 12,5 % /ml d'échantillon) avec un Autoanalyseur (Technicon, Oise - France).
- après ajout d'acide orthophosphorique (0,1 ml H₃PO₄ 5 %/ ml échantillon), les acides gras volatils ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse utilisant l'acid 4 méthyl valérique comme standard interne (chromatographe en phase gazeuse GC 8000, Carlo Erba Instrumen, Milan, Italie) selon la méthode proposée par Jouany (1982) afin d'obtenir la concentration totale en AGV (**[totAGV]**) et les pourcentages des différents acides : acétique (**%C2**), propionique (**%C3**), butyrique (**%C4**), isobutyrique (**%iC4**), valérique (**%C5**), isovalérique (**%iC5**) et caproïque (**%C6**).
- les formes D et L de l'acide lactique (**DlactR** et **LlactR**) ont été mesurées par une méthode enzymatique (kit 112821 D-L-lactic acid, Boehringer Mannheim, Roche diagnostics, Meylan, France).

- la pression osmotique (**PosmR**) a été déterminée avec un osmomètre (Mark3, Fiske, Radiometer Analytical, S.A., Neuilly-Plaisance, France).
- Un premier prélèvement sanguin (1 ml) a été analysé immédiatement pour déterminer, sur le sang total, les gaz dissous, le pH (**pHS**), les teneurs en bicarbonates (**HCO₃⁻**) par un auto-analyseur (ABL77 de Radiometer S.A.S., Neuilly-Plaisance, France).
- Un second prélèvement sanguin (9 ml) dans un tube hépariné a été immédiatement centrifugé (10 min, 4 °C, 4000 g) Le plasma a été réparti en tubes conservés à – 20°C jusqu'aux dosages suivants :
 - glycémie par la méthode hexokinase-glucose-6-phosphatedehydrogenase (Cooper, 1973) (**Glucose**)
 - urée (**Urée**) par une méthode issue de la procédure de Talke et Schubert (1965)
 - Acides Gras Non Estérifiés (**AGNE**) par une adaptation de la méthode enzymatique décrite par Bas (1984)
 - Bêta-hydroxy-butyrate (**BHB**) par la procédure de Barnouin et al. (1986)
 - **Albumine**
 - Acide lactique (**AlactP**)
 - Pression osmotique (**PosmP**), comme pour le rumen

ACP

Trois cinétiques ont été supprimées pour les analyses statistiques : une parce que la chèvre, en crise d'acidose, n'avait quasiment plus de contenu ruminal, les deux autres en raison de valeurs aberrantes (pH ruminiaux élevés et peu variables).

Deux analyses en composantes principales (**ACP**) ont été réalisées pour tous les temps de prélèvements sur, d'une part, seulement des paramètres ruminiaux (**ACP-1** : pHR, LlactR & DlactR, tampon, redox, PosmR, NH₃, []totAGV, %C₂, %C₃, % C₄, %iC₄, % C₅, %iC₅ et C₆) et, d'autre part, des paramètres ruminiaux et sanguins (**ACP-2** : pHR, LlactR & DlactR, tampon, redox, PosmR, NH₃, []totAGV, %C₂, %C₃, % C₄, %iC₄, % C₅, %iC₅ et C₆ et Urée, BHB, HCO₃⁻, Glucose, AlactP, PosmP, Albumine et AGNE). Ces deux ACP ont été réalisées sur 219 points « animaux-jours-temps » (**AJT**).

Analyses statistiques

Les analyses des paramètres sanguins et ruminiaux ont été réalisées sur la moyenne des valeurs mesurées à T2 et T4 pour tous les paramètres, car le pH est le plus bas à ces temps et ce sont les temps pour lesquels les effets d'une éventuelle acidose sont les plus marqués.

Cependant, pour les acides lactiques ruminiaux, la valeur mesurée à T1 a été utilisée car le pic d'acide lactique se situe environ 1 h après la distribution. Seuls deux animaux étaient codés en crise d'acidose pendant les jours de cinétique. Une première analyse statistique incluant l'effet des crises n'ayant montré aucun effet significatif de ces crises, elles n'ont pas été intégrées par la suite.

Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant un modèle linéaire généralisé (Minitab, version 12.2, 1995, Minitab Inc.)

L'analyse de l'effet des levures a été effectuée entre les périodes P2 et P3 selon le modèle suivant :

$$Y_{ijk} = a_i + b_j(\alpha)_i + T + Y + (bT)_j + e_{ijk}$$

Où a_i et b_j représentent les effets fixes de la chèvre i hiérarchisée dans le lot j , T la covariable temps (en jours) et Y la covariable levures (0 = tous les animaux en P2 et lot C pendant P3 et 1 = lot Y pendant P3). e_{ijk} représente l'erreur résiduelle.

Résultats et discussion

Une chèvre du lot levure est morte en tout début de période P4, dans les jours qui ont suivi l'arrêt de la supplémentation. Les données de cette chèvre ont cependant été conservées dans les analyses jusqu'à la fin de la période P3, car elles n'apparaissaient pas aberrantes.

ACP-1 : paramètres ruminiaux

La Figure 1 représente la projection des variables de l'ACP-1 dans le plan 1-2. Les deux premiers axes expliquent plus de 50 % de la variance totale. Cette ACP présente l'opposition classiquement observée entre le pH ruminal et un groupe formé des variables « AGV, pression osmotique, potentiel redox, pouvoir tampon ». Les deux premiers axes permettent également de dissocier les pourcentages des différents AGV ruminiaux. En particulier, des

oppositions sont observées entre, d'une part, le C3 et le C4 sur l'axe 1 et, d'autre part, entre le C2 et C4, sur l'axe 2.

Les paramètres ruminiaux ont évolué dans le plan de l'ACP-1 après le repas (Figure 2), ce qui traduit la modification des paramètres physico-chimiques du rumen consécutive à la distribution de la ration. Les temps T2 et T4 ont des barycentres très proches, ce qui justifie que nous ayons fait la moyenne de leurs valeurs pour l'analyse statistique. De T0 à T4, le pH, dont les valeurs les plus élevées ont été observées en T0, a diminué tandis que le potentiel redox, le pouvoir tampon, les concentrations en AGV, en NH₃, en acide lactique, en butyrate, en isobutyrate et en isovalérate ont augmenté. Les pourcentages des différents AGV ont également été modifiés avec une augmentation des concentrations en C3 et C5, aux dépens de celles en C4, et dans une moindre mesure, de celles en C2, isoC4 et iso C5. Le T6 correspond à un début de retour vers la situation pré prandiale du matin (T0). Le pourcentage d'acide caproïque n'a pas varié au cours de la cinétique. Cette évolution dans le plan est cohérente avec les processus de fermentation de la matière sèche, entraînant une synthèse accrue d'AGV, une augmentation de la pression osmotique, du potentiel redox et du pouvoir tampon, et une diminution du pH. Cette Figure 2 montre, de plus, que les fermentations ruminales entraînent tout d'abord la formation principalement de C4, puis de C5, de C3 et enfin de C2. Ceci est cohérent avec l'observation que la longueur des chaînes carbonées des AGV augmente lorsque le pH diminue, ce qui permet de stocker une quantité plus importante de carbone dans le rumen en minimisant les variations de pH (Sauvant et Van Milgen, 1995). Il est donc logique que la proportion élevée de C5 soit associée aux pH les plus faibles. Ceci est également cohérent avec l'observation que les fermentations ruminales s'orienteraient tout d'abord vers le butyrate, puis vers le propionate, au fur et à mesure que le pH ruminal diminue (Martin *et al.*, 2006).

La projection des AJT dans le plan 1-2 de l'ACP-1 (Figure 3 a) montre que certaines chèvres semblent avoir été préférentiellement représentées dans une zone donnée du plan, mais l'évolution des paramètres au cours des temps de prélèvements rend l'analyse visuelle difficile. En revanche, la projection des barycentres calculés par chèvre (Figure 3 b) permet d'opposer deux groupes de chèvres (2083, 2087, 3128, 4031, 4026) et (2157, 3017, 3019, 4026, 4108), alors que trois animaux sont excentrés par rapport aux groupes précédents (4012, 4029 et 4062). Les deux animaux qui ont respectivement eu trois et quatre crises d'acidose (2157 et 4108) ont des coordonnées relativement proches du centre de cette ACP, et ont donc été peu affectés par ces deux axes, tandis que ceux qui n'ont montré aucune crise d'acidose

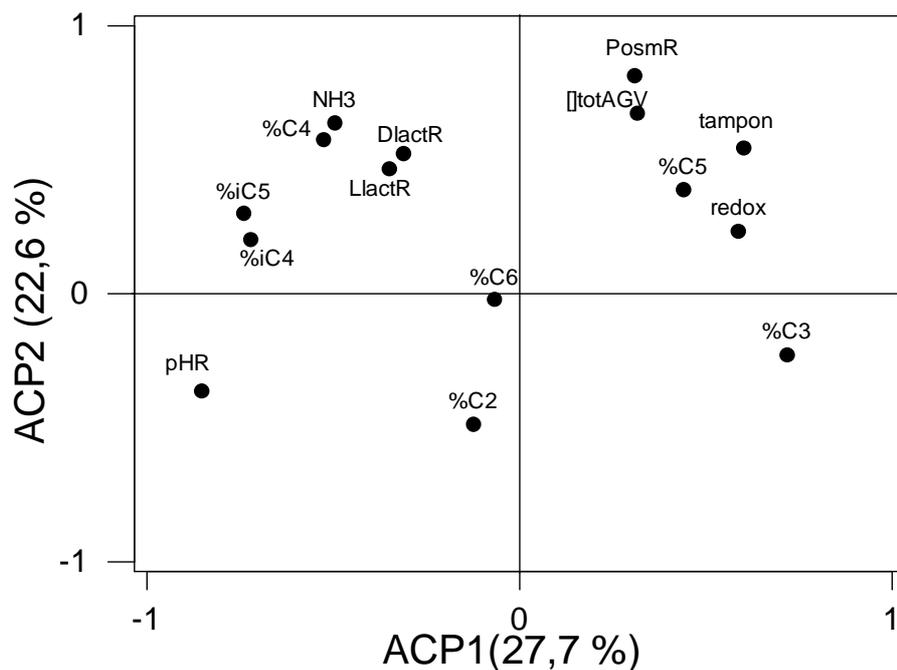


Figure 1. Projection des variables dans le plan 1-2 de l'ACP-1 réalisée sur les paramètres ruminiaux de 12 chèvres laitières en régime acidogène mesurés en cinétique postprandiale.

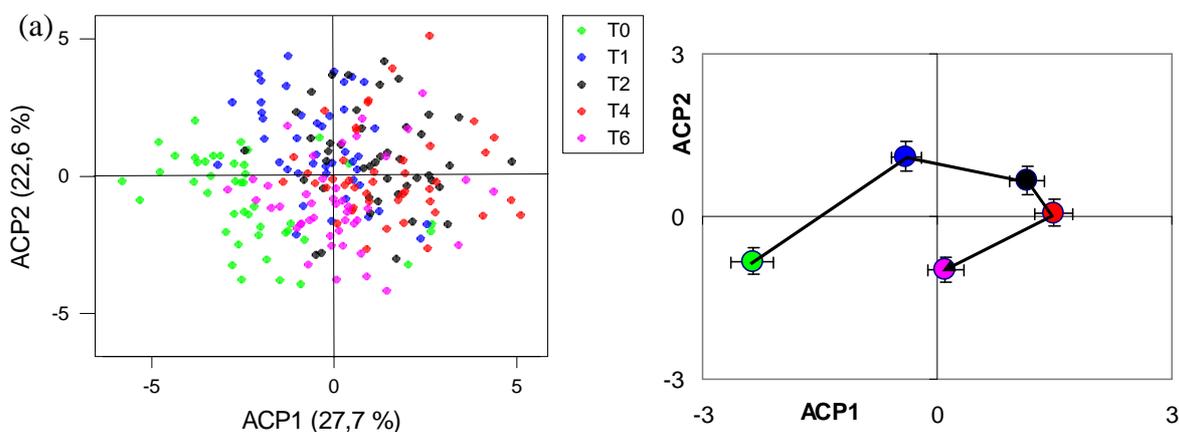


Figure 2. Projection des « animaux-jours-temps » codés par temps de prélèvement (a). Projection des barycentres et erreurs standards calculés pour chaque temps de prélèvement, et représentation de l'évolution postprandiale des AJT (la flèche représente l'évolution de T0 à T6) (b) dans le plan 1-2 de l'ACP-1 réalisée sur les paramètres ruminiaux en cinétique postprandiale.

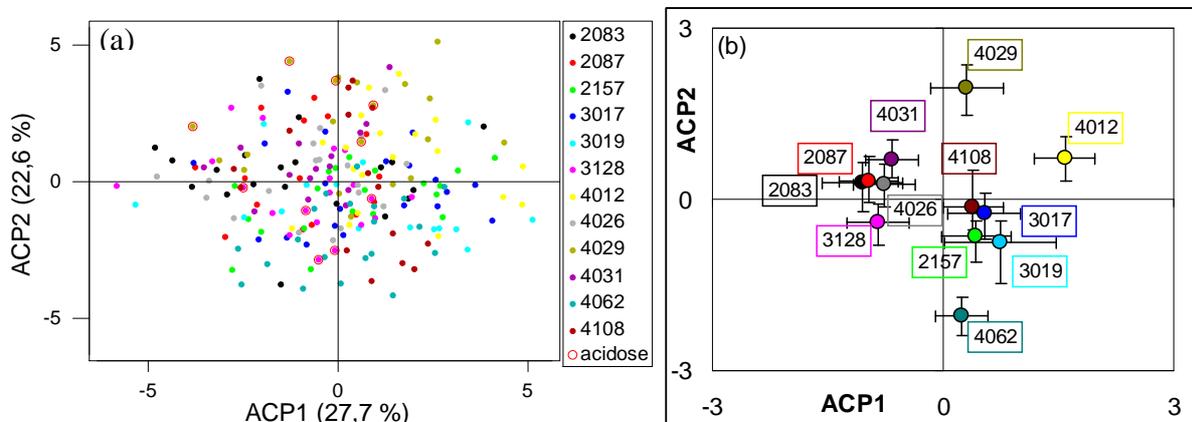


Figure 3. Projection des « animaux-jours-temps » codés par chèvre (a), et projection des barycentres et erreurs standards calculés pour chaque chèvre (b) dans le plan 1-2 de l'ACP-1 réalisée sur les paramètres ruminiaux en cinétique postprandiale.

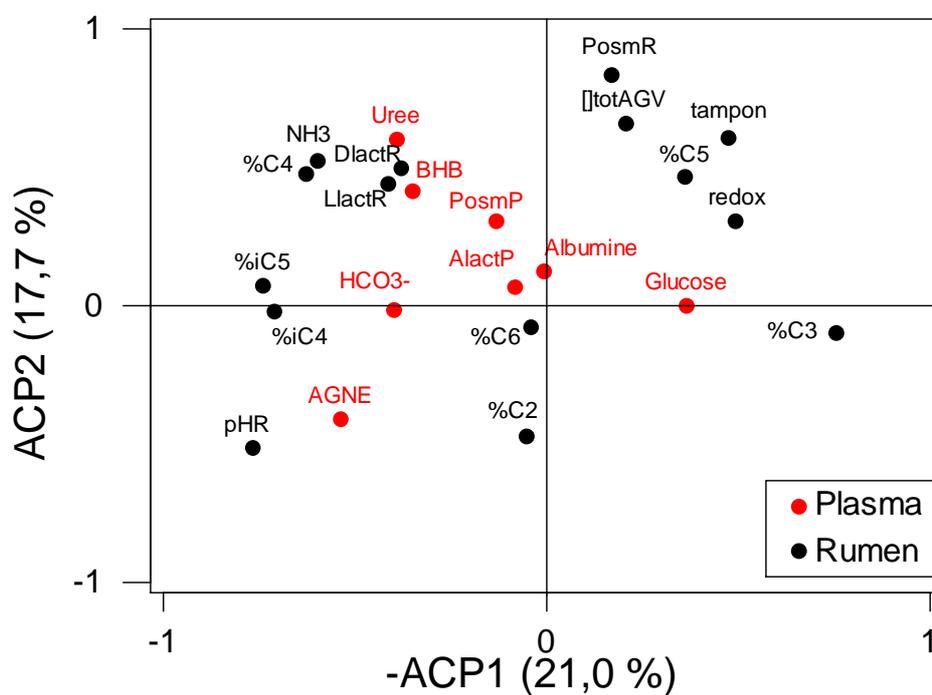


Figure 4. Projection des variables dans le plan 1-2 de l'ACP-2 réalisée sur les paramètres ruminiaux et sanguins de 12 chèvres laitières en régime acidogène mesurés en cinétique postprandiale.

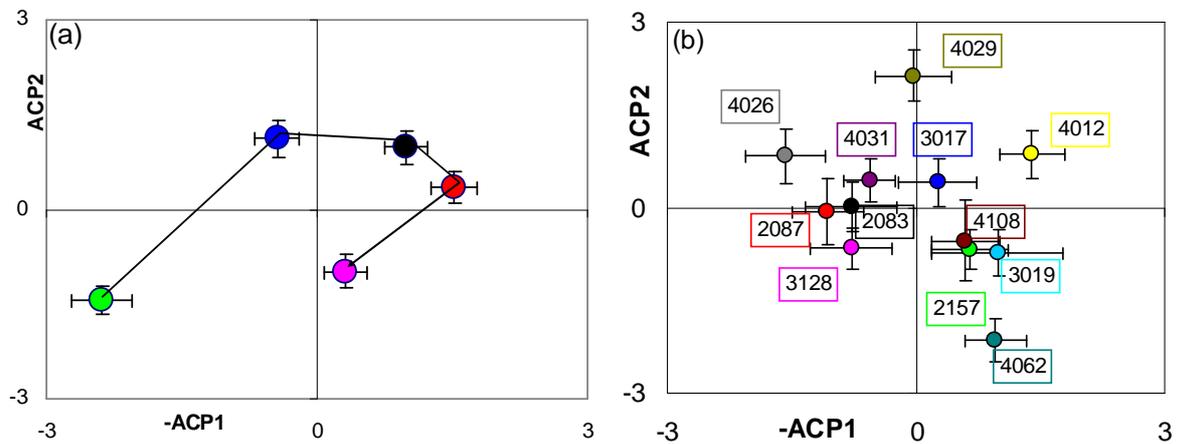


Figure 5. Projection des barycentres et erreurs standards des « animaux-jour-temps » codés par temps de prélèvement (la flèche représente l'évolution de T0 à T6) (a), ou par chèvre, (b) dans le plan 1-2 de l'ACP-2 réalisée sur les paramètres ruminiaux et sanguins en cinétique postprandiale.

(2083 et 4026) sont dans le premier groupe cité, et donc, dans la partie du plan correspondant aux pH ruminiaux relativement élevés.

ACP-2 : paramètres ruminiaux et sanguins

La Figure 4 représente la projection des variables de l'ACP-2 dans le plan 1-2 de cette ACP-2. Les deux premiers axes représentent presque 39 % de la variance totale. Cette figure montre, tout d'abord, que les paramètres ruminiaux sont représentés de manière très similaire à leur représentation dans le plan 1-2 de l'ACP-1. Ceci indique que l'évolution des paramètres ruminiaux a plus d'influence sur la variabilité expliquée dans ce plan 1-2, que l'évolution des paramètres sanguins.

La projection des barycentres des AJT par temps de prélèvement (Figure 5 a) est très similaire à celle obtenue pour l'ACP-1. Elle montre, cependant, que le pH ruminal élevé avant le repas est associé à des concentrations relativement élevées d'AGNE, certainement dues à la longue période sans grande ingestion pendant la nuit. Entre T0 et T1, la concentration plasmatique en BHB et en urée a augmenté, ce qui est dû, pour l'urée, à la corrélation généralement observée entre urée plasmatique et NH₃ ruminal. L'augmentation des corps cétoniques résulte de l'augmentation des fermentations ruminales. Entre T1 et T2, la pression osmotique, l'acide lactique et l'albumine ont augmenté dans le plasma, simultanément à l'augmentation de la pression osmotique ruminale et à la concentration en AGV ruminale. L'augmentation de l'acide lactique sanguin est certainement une conséquence passive de l'augmentation de l'acide lactique ruminal entre T0 et T1. Entre T2 et T4, peu de modifications sont à nouveau détectables, mis à part l'augmentation de la glycémie.

La Figure 5 b représente la projection des barycentres des AJT par chèvre. Cette figure est très similaire à celle obtenue pour l'ACP-1, même si les deux groupes sont moins visibles, et les chèvres plus réparties dans le plan. Cependant, les deux chèvres qui ont eu le plus de crises d'acidose sont toujours très proches l'une de l'autre dans ce plan (4108 et 2157), et la chèvre 3019, qui est morte à la fin de la période de supplémentation en levures, est également proche de ce groupe. Les animaux de cette zone semblent donc plus susceptibles à l'acidose. Cette observation semble confirmée par le fait que les deux chèvres qui n'ont fait aucune acidose leur sont diagonalement opposées (2083 et 4026), mais la relation entre la position dans le plan et le nombre d'épisodes d'acidose semble beaucoup moins évidente pour les autres animaux. Ces trois chèvres (4108, 2157 et 3019) sont, de plus, situées assez près du centre de l'ACP, et leurs paramètres ont donc peu varié dans ce plan. Ces chèvres semblent cependant

avoir présenté, en moyenne, des concentrations en bicarbonates sanguins relativement faibles, et des concentrations d'urée et de BHB relativement élevées. Les bicarbonates sanguins représentent une réserve de tampons pouvant être apportée au rumen par l'intermédiaire de la salive (Giger-Reverdin *et al.*, 2006). La faible teneur en bicarbonates est le signe d'une acidose métabolique (pH sanguin bas). Elle peut cependant être simultanément une cause d'acidose et une conséquence d'acidoses antérieures. De même, la concentration élevée de BHB peut être due à des crises d'acidoses récentes ayant entraîné une chute importante d'ingestion (chapitre 3.1). Ceci ne nous permet donc pas d'identifier un critère ruminal ou sanguin particulier responsable de la plus forte sensibilité à l'acidose de certaines chèvres.

Analyse de l'influence des levures sur les paramètres ruminiaux

Le Tableau 2 présente l'influence des levures sur les paramètres ruminiaux. Les pourcentages de C2, de C3 et de C4 sont cohérents avec ceux habituellement décrits dans la littérature 60 à 65 % de C2, 18 à 20 % de C3, 10 à 15 % de C4 et de 2 à 5 % pour les acides gras mineurs (revue par Jarrige, 1988). Les quantités totales d'AGV, mesurées dans cette expérience sont comprises dans l'intervalle de 70-150 mmol / l proposé par McDonald *et al.* (2002). D'après ces auteurs et Jarrige (1978), l'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration augmenterait la proportion de C3 au détriment de celle de C2, ce qui n'a pas été observé dans cette expérience. La concentration en ammoniacque, critère de disponibilité en azote pour la population microbienne est supérieure à 70 mg N/l, ce qui montre qu'il n'y a pas eu de limitation due à ce facteur (Jarrige *et al.*, 1978). L'augmentation de la pression osmotique après le repas est cohérente avec la revue de Jarrige (1995) montrant que la pression osmotique ruminale augmente dans les 30 à 90 min suivant l'ingestion pour atteindre 350 à 400 mOsm /l. La valeur moyenne entre T2 et T4 est donc cohérente avec ces ordres de grandeur. Le potentiel rédox mesuré est dans la partie inférieure de l'intervalle -300 à -500 mV (Jarrige *et al.*, 1995) mesuré à pH 7, ce qui peut être dû au pH ruminal inférieur.

La supplémentation en levures a augmenté la pression osmotique ruminale ($P = 0.040$), les pourcentages de C6 ($P = 0.010$), d'iC4 ($P = 0.020$), d'iC5 ($P = 0.020$) et a eu tendance à augmenter celui de C5 ($P = 0.085$). Cette augmentation des proportions des acides gras mineurs ne s'est cependant pas faite au détriment d'une autre catégorie d'AGV en particulier. Aucune influence des levures sur les autres paramètres ruminiaux n'a été observée. Ces résultats sont cohérents avec certaines observations ne montrant aucun effet de l'addition de levures sur la concentration totale en AGV (Quinonez *et al.*, 1988 ; Piva *et al.*, 1993 ; Doreau

Tableau 2. Influence des levures et de l'acidose sur les paramètres ruminiaux utilisés dans les ACP.

	n ^a	Effet des levures			rmse
		C	Y	P	
pH	35	6,2	6,3	NS	0,20
Potentiel rédox (V)	35	-352	-349	NS	14,1
Pouvoir tampon	35	0,03	0,03	NS	0,008
AGV (mmol/l)	35	119	130	NS	19,5
% C2	35	64,5	64,9	NS	1,48
% C3	35	20,5	20,0	NS	2,14
% C4	35	12,1	11,8	NS	1,61
% C5	35	1,18	1,47	†	0,094
% C6	35	0,53	0,91	**	0,105
% iC4	35	0,87	1,35	*	0,154
% iC5	35	0,77	1,29	*	0,159
Pression osmotique (mOsm/l)	35	340	423	*	30,1
NH3 (mg/l)	35	74	87	NS	42,1
Acide D-lactique (mmol/l)	35	0,65	0,54	NS	0,278
Acide L-lactique (mmol/l)	44	0,68	0,70	NS	0,058

^a nombre d'observations

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

et Jouany, 1998 ; Robinson et Garrett, 1999), même si certaines expériences ont montré un effet négatif (Williams *et al.*, 1991) ou positif (Mutsvangwa *et al.*, 1992 ; Roa *et al.*, 1997) des levures sur la concentration ruminale en AGV. La méta-analyse présentée dans cette thèse (Chapitre 1.7) a, en revanche, montré que la supplémentation en levures augmentait la concentration totale en AGV ruminiaux, ce qui n'est pas retrouvé dans cette expérience. Cependant, l'absence d'effet sur la proportion des principaux AGV est cohérente avec l'absence d'effet observé sur le rapport acétate sur propionate dans cette même méta-analyse (Desnoyers *et al.*, 2008), et dans certains résultats de la littérature (Mutsvangwa *et al.*, 1992 ; Yoon et Stern, 1996). Les résultats publiés sont également variables pour ce paramètre.

Analyse de l'influence des levures sur les paramètres sanguins

Le Tableau 3 présente l'influence des levures et de l'acidose sur les paramètres sanguins. Seule, la concentration en bicarbonates a été augmentée par la supplémentation en levures ($P = 0.02$), contrairement aux résultats de Beauchemin *et al.* (2003) ou de Castillo *et al.* (2006), qui ne montraient aucune modification de la teneur en bicarbonate sanguin pour les animaux supplémentés. Cependant, ces résultats sont en accord avec ceux de Hejlasz et Nicponn (1977, cités par Aslan *et al.*, 1995). Ainsi, en présence de levures, le niveau élevé de bicarbonates sanguins dont le pK_A est de 6,25 pourrait avoir limité la chute de pH ruminale postprandiale (Giger-Reverdin *et al.*, 2006). Aucune influence des levures n'a été observée sur les autres paramètres pour lesquels les résultats sont très variés dans la littérature. Certains papiers ne montrent aucune influence des levures sur les paramètres plasmatiques (Wohlt *et al.*, 1991 ; Piva *et al.*, 1993 ; Beauchemin *et al.*, 2003 ; Lesmeister *et al.*, 2004), tandis que d'autres montrent une augmentation du BHB (Quigley *et al.*, 1992), des AGNE et du BHB (Giger-Reverdin *et al.*, 1996), une diminution de la glycémie (Giger-Reverdin *et al.*, 1996) ou son augmentation (Piva *et al.*, 1993).

Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude montrent une évolution des paramètres ruminiaux et sanguins, suite à la distribution de nourriture, cohérente avec la littérature. Une analyse multivariée a montré qu'il existe une grande variabilité individuelle des paramètres ruminiaux et sanguins. Cette analyse multivariée a également montré qu'il semble exister un lien entre

Tableau 3. Influence des levures et de l'acidose sur les paramètres sanguins utilisés dans l'ACP.

	n ^a	Effet des levures			rmse
		C	Y	P	
Bicarbonates (mmol/l)	35	27,4	35,4	*	2,41
Pression osmotique (mOsm/l)	35	294	293	NS	2,7
Glycémie (g/l)	35	0,54	0,55	NS	0,028
AGNE (μEq/l)	35	107,4	109,6	NS	26,93
Urée (g/l)	35	0,25	0,27	NS	0,081
BHB ^b (mg/l)	34	43.0	38.6	NS	12,83
Albumine (g/l)	35	36,3	34,7	NS	1,12
Acide lactique (mmol/l)	35	0,43	0,46	NS	0,108

^a nombre d'observations pour l'analyse de l'effet des levures

^b une valeur aberrante a été retirée pour l'analyse

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

les paramètres ruminiaux et sanguins et la susceptibilité des animaux à l'acidose, en particulier le nombre d'épisodes d'acidose observés, mais les résultats sont à confirmer. Seule la pression osmotique ruminale, la proportion en AGV mineurs dans le rumen et la concentration en bicarbonates plasmatique ont été influencés par l'apport de levures. L'écosystème microbien ruminal nécessitant généralement plusieurs semaines d'adaptation aux modifications de son environnement, il serait intéressant de pouvoir déterminer, tout d'abord, s'il existe des temps de latence avant l'apparition de différences entre les animaux supplémentés et les témoins, et ensuite s'il existe un effet rémanent de la supplémentation en levures pour les animaux supplémentés.

Références

- Abd El-Ghani, A. A. 2004. Influence of diet supplementation with yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on performance of Zaraibi goats. *Small Rumin. Res.* 52: 223-229.
- Ali-Haimoud-Lekhal, D., Lescoat, P., Bayourthe, C. et Moncoulon, R. 1999. Effets de *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus oryzae* sur les performances zootechniques chez la vache laitière : étude bibliographique. 6^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, 1999/12/1-2. 157.
- Aslan, V., Thamsborg, S. M., Jorgensen, R. J. et Basse, A. 1995. Induced acute ruminal acidosis in goats treated with yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) and bicarbonate. *Acta Vet. Scand.* 36: 65-77.
- Barnouin, J., El Idilbi, N., Chilliard, Y., Chacornac, J. P. et Lefaivre, R. 1986. Micro-dosage automatisé sans déprotéinisation du β -hydroxybutyrate plasmatique chez les bovins. *Ann. Rech. Vet.* 17: 129-139.
- Bas, P. 1984. Détermination enzymatique des acides gras non estérifiés dans le plasma de chèvre. *Ann. Rech. Vet.* 15: 7-16.
- Beauchemin, K. A., Yang, W. Z., Morgavi, D. P., Ghorbani, G. R., Kautz, W. et Leedle, J. A. Z. 2003. Effects of bacterial direct-fed microbials and yeast on site and extent of digestion, blood chemistry, and subclinical ruminal acidosis in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81: 1628-1640.
- Castillo, C., Benedito, J. L., Mendez, J., Garcia-Partida, P., Vazquez, P., Pereira, V., Lopez-Alonso, M. et Hernandez, J. 2006. Effects of long-term dietary supplementation of monensin or *Saccharomyces cerevisiae* on blood acid-base and productive

- performance in growing feedlot steers. *Berliner und Munchener Tierarztliche Wochenschrift* 119.
- Cooper, G. R. 1973. Methods for determining the amount of glucose in blood. *CRC Critical Reviews in Clinical Laboratory Science* 4: 101-107.
- Desnoyers, M., Giger-Reverdin, S., Bertin, G., Duvaux-Ponter, C. et Sauvant, D. 2008. Meta-analysis of the Influence of *Saccharomyces cerevisiae* Supplementation on Ruminant Parameters and Milk Production of Ruminants. *Journal of Dairy Science (Submitted)*.
- Doreau, M. et Jouany, J. P. 1998. Effect of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on nutrient digestion in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81: 3214-3221.
- Erasmus, L. J., Botha, P. M. et Kistner, A. 1992. Effect of yeast culture supplement on production, rumen fermentation, and duodenal nitrogen flow in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 75: 3056-3065.
- Giger-Reverdin, S., Bezault, N., Sauvant, D. et Bertin, G. 1996. Effects of a probiotic yeast in lactating ruminants: interaction with dietary nitrogen level. *Anim. Feed Sci. Technol.* 63: 149-162.
- Giger-Reverdin, S., Maaroufi, C., Jarnot, L., Müller, R., Bontems, V. et Sauvant, D. 2000. Influence de la granulométrie du pois et du niveau azoté du régime sur son pouvoir tampon pour des chèvres en lactation. 7th International Conference on Goats, Tours (France), 2000/05/15-18. Institut de l'Elevage and INRA. 86-88.
- Giger-Reverdin, S., Desnoyers, M., Duvaux-Ponter, C. et Sauvant, D. 2006. Rumen and metabolic acidosis in dairy goats are independent. *J. Anim. Sci. JAS* 84 Suppl.1, *JDS* 89 (Suppl. 1): 215.
- Jarrige, R. 1978. Digestion. *Alimentation des ruminants*. Ed. INRA: 23-45.
- Jarrige, R., Journet, M., Vérité, R., Champredon, C. et Pion, R. 1978. Azote. (Nitrogen). *Alimentation des ruminants. (Ruminant nutrition)*. Ed. R. Jarrige. Versailles. France, INRA Publications: 89-128.
- Jarrige, R. 1988. Ingestion et digestion des aliments. *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Ed. Paris, INRA: 34-40.
- Jarrige, R., Dulphy, J.-P., Faverdin, P., Baumont, R. et Demarquilly, C. 1995. Le contenu du réticulo-rumen. *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion. (Nutrition of domestic ruminants: ingestion and digestion)*. Ed. R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M. H. Farce et M. Journet. Paris, France, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA): 253-298.

- Jouany, J.-P. 1982. Dosage des acides gras volatils (A.G.V.) et des alcools dans les contenus digestifs, les jus d'ensilage, les cultures bactériennes et les contenus de fermenteurs anaérobies. *Sci. Alim.* 2: 131-144.
- Kleen, J. L., Hooijer, G. A., Rehage, J. et Noordhuizen, J. P. T. M. 2003. Subacute ruminal acidosis (SARA): a review. *J. Vet. Med. Ser. A.* 50: 406-414.
- Lescoat, P., Ali-Haimoud-Lekhal, D. et Bayourthe, C. 2000. Effets de *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus Oryzae* sur la digestion et le fonctionnement ruminal : étude bibliographique. 7^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France. 199.
- Lesmeister, K. E., Heinrichs, A. J. et Gabler, M. T. 2004. Effects of supplemental yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) culture on rumen development, growth characteristics, and blood parameters in neonatal dairy calves. *J. Dairy Sci.* 87: 1832-1839.
- Martin, C., Brossard, L. et Doreau, M. 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *Prod. Anim.* 19: 93-108.
- MCDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D. et Morgan, C. 2002. Microbial digestion in ruminants and other herbivores. *Animal nutrition*, sixth edition. Ed. P. Education: 179-198.
- Mutsvangwa, T., Edwards, I. E., Topps, J. H. et Paterson, G. F. M. 1992. The effect of dietary inclusion of yeast culture (Yea-Sacc) on patterns of rumen fermentation, food intake and growth of intensively fed bulls. *Anim. Prod.* 55: 35-40.
- Piva, G., Belladonna, S., Fusconi, G. et Sicbaldi, F. 1993. Effects of yeast on dairy cow performance, ruminal fermentation, blood components, and milk manufacturing properties. *J. Dairy Sci.* 76: 2717-2722.
- Quigley, J. D., III, Wallis, L. B., Dowlen, H. H. et Heitmann, R. N. 1992. Sodium bicarbonate and yeast culture effects on ruminal fermentation, growth, and intake in dairy calves. *J. Dairy Sci.* 75: 3531-3538.
- Quinonez, J. A., Bush, L. J., Nalsen, T. et Adams, G. D. 1988. Effect of yeast culture on intake and production of dairy cows fed high wheat rations. *Animal Science Research Report*. Agricultural Experiment Station, Oklahoma State University
- Roa, V. M. L., Barcena-Gama, J. R., Gonzalez, M. S., Mendoza, M. G., Ortega, C. M. E. et Garcia, B. C. 1997. Effect of fiber source and a yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* 1026) on digestion and the environment in the rumen of cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 64: 327-336.

- Robinson, P. H. et Garrett, J. E. 1999. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on adaptation of cows to postpartum diets and on lactational performance. *J. Anim. Sci.* 77: 988-999.
- Robinson, P. H. 2002. Yeast products for growing and lactating dairy cattle: impacts on rumen fermentation and performance. XII International Meeting on milk and meat production in hot climates, Mexicali, Mexico, 3-4 october 2002. 12 p.
- Sauvant, D. et Van Milgen, J. 1995. Dynamic aspects of carbohydrate and protein breakdown and the associated microbial matter synthesis. Ruminant physiology: digestion, metabolism, growth and reproduction. Proceedings 8th International Symposium on Ruminant Physiology. Ed. W. Von Engelhardt, S. Leonhard-Marek, G. Breves et D. Giesecke. Albany Germany, Delmar Publishers: 71-91.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S. et Schmidely, P. 2004. Rumen acidosis: modeling ruminant response to yeast culture. Alltech's 20th Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry. Re-imagining the feed industry. Ed. T. P. Lyons et K. A. Jacques, Nottingham University Press: 221-229.
- Stella, A. V., Paratte, R., Valnegri, L., Cigalino, G., Soncini, G., Chevaux, E., Dell'Orto, V. et Savoini, G. 2007. Effect of administration of live *Saccharomyces cerevisiae* on milk production, milk composition, blood metabolites, and faecal flora in early lactating dairy goats. *Small Rumin. Res.* 67: 7-13.
- Talke, H. et Schubert, G. E. 1965. Enzymatische Harnstoffbestimmung in Blut and Serum in Potischen Test nach Warburg. *Klin. Wochenschr.* 43: 147-182.
- Tremere, A. W., Merrill, W. G. et Loosli, J. K. 1968. Adaptation to high concentrate feeding as related to acidosis and digestive disturbances in dairy heifers. *J. Dairy Sci.* 51: 1065-1072.
- Uhart, B. A. et Carroll, F. D. 1967. Acidosis in beef steers. *J. Anim. Sci.* 26: 1195-1198.
- Wheatherburn, M. W. 1967. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. *Anal. Chem.* 38: 971-974.
- Williams, P. E., Tait, C. A., Innes, G. M. et Newbold, C. J. 1991. Effects of the inclusion of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* plus growth medium) in the diet of dairy cows on milk yield and forage degradation and fermentation patterns in the rumen of steers. *J. Anim. Sci.* 69: 3016-3026.
- Wohlt, J. E., Finkelstein, A. D. et Chung, C. H. 1991. Yeast culture to improve intake, nutrient digestibility, and performance by dairy cattle during early lactation. *J. Dairy Sci.* 74: 1395-1400.

Yoon, I. K. et Stern, M. D. 1996. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* cultures on ruminal fermentation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 79: 411-417.

CHAPITRE 5

Influence des levures et de l'acidose sur le comportement alimentaire

**CHAPITRE 5 : Influence des levures et de l'acidose sur le
comportement alimentaire**

**1. Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres
laitières recevant deux régimes différant par leur pourcentage de
concentré. Influence sur le budget-temps et le comportement
alimentaire**

*Live yeast supplementation and acidosis in dairy goats receiving two
diets differing by their percentage of concentrate. Influence on
time-budget and feeding behaviour*

**2. Une nouvelle méthode d'analyse des cinétiques d'ingestion par
segmentation / classification. Application à l'acidose et à la
supplémentation en levures**

1. Supplémentation en levures vivantes et acidose chez des chèvres laitières recevant deux régimes différant par leur pourcentage de concentré. Influence sur le budget-temps et le comportement alimentaire

L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration de ruminants peut entraîner de l'acidose sub-clinique et une modification du comportement alimentaire. L'apport de levures pourrait permettre de stabiliser les fermentations ruminales et pourrait donc également influencer le comportement alimentaire des animaux.

Objectif

→ Analyser simultanément l'influence du pourcentage de concentré et de l'acidose ou de la supplémentation en levures et de l'acidose sur le budget-temps et le comportement alimentaire de chèvres en lactation.

Matériels et méthodes

Douze chèvres, en milieu de lactation, réparties en deux groupes, ont successivement reçu deux régimes plus ou moins riches en concentré (L : 20 % et H : 50 %). Les animaux ont d'abord reçu le régime L pendant 2 semaines, puis le régime H pendant 11 semaines, puis à nouveau le régime L pendant 3 semaines. La ration était distribuée deux fois par jour, à raison d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi. Après trois semaines de régime H, six animaux ont reçu quotidiennement 10 g de levures ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech) en deux apports égaux avant chaque distribution de ration. Les quantités ingérées ont été mesurées quotidiennement et la production laitière, cinq jours par semaine. Les crises d'acidose ont été codées en utilisant les chutes successives d'au moins deux des paramètres : pH, ingestion et production laitière.

Les chèvres ont été filmées par des caméras durant 24 h chaque week-end et le budget-temps a été analysé grâce au logiciel The Observer® (Noldus Technology, The Netherlands) (cf. Ethogramme en annexe 2). La quantité d'aliment restant dans les bacs était mesurée toutes les deux min par des balances, ce qui a permis d'identifier les repas. L'activité masticatoire était mesurée par des APECs, permettant d'obtenir les durées d'ingestion, de rumination et de repos masticatoire, ainsi que la durée de chaque période et le nombre de bols par période de rumination. La composition chimique de la ration et des refus a été analysée deux fois pendant la supplémentation et deux fois en régime H en dehors de cette période.

Résultats

La distribution du régime H a entraîné une diminution du pourcentage de temps passé à ruminer, au profit du pourcentage de temps passé à se reposer. Ceci est principalement dû à une diminution du temps de rumination pendant la nuit. En revanche, la durée des périodes et le nombre de bols par période de rumination n'ont pas été modifiés. La distribution du régime H a diminué les quantités totales ingérées et la vitesse moyenne d'ingestion, mais n'a pas influencé le pourcentage de temps passé à ingérer.

L'apport de levures n'a eu aucune influence sur les pourcentages de temps passés dans les activités d'ingestion, de rumination ou de repos. Les levures ont augmenté le tri des animaux qui ont ingéré un régime moins fibreux que celui distribué et que celui ingéré par les animaux non supplémentés. La supplémentation en levures a augmenté la durée et la taille du repas principal de l'après midi.

Les crises d'acidose ont eu une influence sur la majorité des paramètres testés. Elles ont entraîné une déstructuration de l'organisation du comportement alimentaire, une diminution des temps d'ingestion et de rumination, mais une augmentation du temps pendant lequel les chèvres sont restées couchées-recroquevillées pendant la journée.

Discussion et conclusion

- Peu d'effets du régime ont été observés, mis à part pour la rumination. Cependant, la diminution de la rumination pendant la phase nocturne est surprenante et contraire aux résultats de la littérature. Le fait que les deux régimes se soient avérés acidogènes, pourrait, par contre, expliquer le peu de différences observées sur les autres paramètres.

- La supplémentation en levures a entraîné quelques modifications du comportement alimentaire et a, en particulier, modifié la composition du régime réellement ingéré par les animaux.

- Les crises d'acidose ont eu une influence importante sur la majorité des paramètres testés, et cette influence a été plus importante que les effets du régime ou des levures pour la plupart des paramètres. Ceci confirme l'importance, et surtout l'intérêt d'avoir codé ces crises.

- Le codage nous a permis d'éviter une confusion entre les effets engendrés par l'acidose et ceux dus au régime ou aux levures et pourrait expliquer la très forte variabilité observée dans la littérature, dans la mesure où aucune des publications étudiées n'a pris en compte l'occurrence de ces crises.

Live yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation and acidosis in dairy goats receiving two diets of differing concentrate proportion. Influence on time-budget and feeding behaviour

Desnoyers M^{1,2}, Giger-Reverdin S.¹, Sauvant D.¹, Bertin, G.² and Duvaux-Ponter. C.¹

¹*UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude Bernard 75005 Paris, France*

²*Alltech France, 14 place Marie-Jeanne Bassot 92593 Levallois-Perret cedex, France*

Soumis à Applied Animal Behaviour Science

Abstract

Increasing the percentage of concentrate in the diet can influence feeding behaviour of ruminants. It can also lead to subacute rumen acidosis and the addition of yeast to the rumen ecosystem might influence fermentation and subsequently help the ecosystem deal with the consequences of high concentrate diets. The aim of this study was to analyse simultaneously the influence of bouts of acidosis and yeast supplementation on feeding behaviour and time-budget of dairy goats fed two diets of differing concentrate proportion. Increasing the proportion of concentrate in the diet decreased the duration of rumination, especially during the night. Yeast supplemented goats ate a less fibrous diet than the one eaten by control goats. Yeast supplementation increased the duration of eating and DMI of the afternoon main meal but did not influence rumination. Bouts of acidosis influenced most of the tested parameters. They increased time spent eating per gram of DMI, decreased duration of rumination, especially during the night. They also decreased the number of meals per day, daily intake rate, duration of afternoon main meal and number and duration of rumination bouts. The greater effects of bouts of acidosis when compared to the effects of diet and yeast supplementation indicates that experiments dealing with high concentrate diets have to be analysed very carefully accounting for the occurrence of acidosis.

Key-words: acidosis, yeast, feeding behaviour, time-budget

1. Introduction

Off-feed periods due to subacute ruminal acidosis (SARA mean rumen pH below 6.25 (Sauvant et al., 1999)) are one of the major consequences of feeding high concentrate diets to high producing ruminants (Uhart and Carroll, 1967; Tremere et al., 1968; Martin et al., 2006). SARA is poorly detected in herds and has many consequences, such as decreased milk production, decreased efficiency of milk production, premature culling and increased mortality (Krause and Oetzel, 2005). Off-feed periods represent an important economic loss and can significantly alter future production potential and health of the animal. Yeast supplementation of the rumen may modify ruminal fermentation and limit the decrease in rumen pH that is often observed with the feeding of high concentrate diets (Jouany, 2001; Chaucheyras-Durand and Fonty, 2002). Yeast supplementation of the rumen has been reported to increase milk production (see reviews by Robinson, 2002; Abd El-Ghani, 2004; Stella et al., 2007) and influence a number of rumen fermentation parameters (Erasmus et al., 1992; Robinson, 2002). Results are however very inconsistent between different studies. Bach *et al.* (2007) studied the influence of yeast supplementation on the feeding behaviour of dairy cows and showed that yeast-supplemented cows had a greater meal frequency than controls.

Daily durations of intake and rumination decrease, particularly during daylight, when the percentage of concentrate in the diet of goats increases (Focant, 1984; Dulphy and Carle, 1986; Kawas et al., 1991). Abijaoudé et al. (2000a) showed that increasing the percentage of concentrate in the diet of dairy goats increased the daily number of meals and the rate of intake during the first meal after feed (main meal). However, it decreased the duration of this main meal and the rate of intake during other meals (secondary meals) (Abijaoudé et al., 2000a). Thus, goats are able to adapt their feeding behaviour to the offered diet in order to limit the consequences of the supply of large quantities of carbohydrates into the rumen after feed (Abijaoudé et al., 2000b). Increasing the percentage of concentrate in the diet decreased the number of rumination bouts without influencing their mean duration (Focant, 1984) and increased the time to the first rumination bout (Focant, 1984; Dulphy et al., 1990).

Because the risk of acidosis increases with ascending inclusion of concentrate in the diet which can lead to off-feed periods, effects of acidosis and diet can confound any subsequent data analysis. Thus, bouts of acidosis that might occur due to high concentrate diets have to be taken into account when analysing the effects of yeast supplementation. Even if the effects of acidosis and yeast supplementation are frequently studied from digestive and metabolic points of view, behavioural parameters were very seldom taken into account. The objective of this

study was to simultaneously analyse the effect of bouts of acidosis and proportion of dietary concentrate, or of bouts of acidosis and effects of yeast supplementation on feeding behaviour and time-budget in dairy goats.

2. Materials and methods

2.1. Animals and housing

The trial was conducted on twelve rumen cannulated dairy goats (4 Saanen and 8 Alpine) (40 ± 4.0 days in milk at the start of the experiment), averaging 65 ± 7.4 kg of body weight, producing 3.5 ± 0.58 kg milk per day at the start of the study and which had never been included in any previous study investigating acidosis. The experiment was conducted under the guidelines given by the French Agriculture Ministry. Goats were allocated into two groups according to their previous milk yield, body weight after parturition, breed and feeding behaviour. The last criteria was taken into account by using the proportion of the daily feed eaten 100 min after the afternoon feed which corresponds to the maximal between-goats variability. It was measured in the previous autumn. The two groups differed only by ruminal yeast supplementation. The yeast (**Y**) group received 10 g of dried live yeast daily ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech KY, one 5 g dose at each feed) via the rumen cannulae. The control group (**C**) did not receive any supplementation. Goats were kept in 2 m*1 m individual pens during the whole experiment.

2.2. Experimental design and composition of the experimental diets

Experimental design was divided into five experimental periods (Fig. 1). Animals started to receive the high concentrate (50 %) diet (**H**) following two weeks of adaptation (**P1**) to the housing environment whilst receiving the low (20 %) concentrate diet (**L**) and one week of transition diet. Following a further three weeks of adaptation to H (**P2**), the Y group received yeasts for a period of five weeks (**P3**). After completion of yeast supplementation all animals continued to receive diet H during the following three weeks (**P4**). Following the completion of P4 all animals received a transition diet for a period of one week followed by three weeks of diet L (P5). Diet compositions are given in Table 1. Energy value of the diets was calculated according to the analytical method proposed by Vermorel (1988) and taking into account the digestive interactions due to both feeding level and proportion of concentrate in the diet (Sauvant and Giger-Reverdin, 2007). Nitrogen values of the diets were calculated

Table 1. Composition and analysis of the two experimental diets containing low (L) or high (H) percentage of concentrate.

diet	L	H
<i>Composition (% DM):</i>		
Concentrate ^a	20	50
Dehydrated lucerne hay	32	0
Grass hay	19	35
Sugarbeet pulp	29	15
Dry Matter (%)	54.8	63.0
Net Energy UFL /kg DM	0.77	0.91
PDIN ^b g/kg DM	85	95
PDIE ^b g/kg DM	96	103
<i>Analysis (% DM)</i>		
NDF	39.9	34.7
ADF	21.4	15.9
ADL	4.0	1.8
OM	92.6	93.6
Starch	24.1	8.4

^a25% wheat, 25% barley, 30% maize, 15% soyabean meal, 3 % mineral premix and 2 % molasses

^b Calculated from the INRA Tables (Baumont et al., 2007)

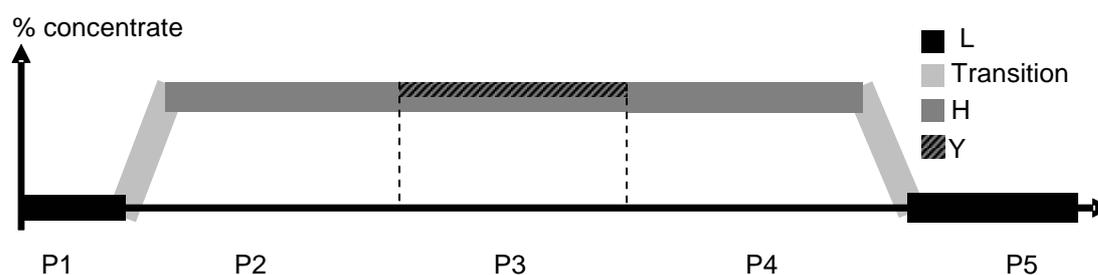


Fig. 1. Description of the experimental design followed by 12 dairy goats successively offered low (L, 20 %) or high (H, 50 %) concentrate diets. Experimental period P1 lasted two weeks, P2, P4 and P5 lasted 3 weeks, P3 lasted 5 weeks during which half of the goats (Y) received yeast daily.

according to the additive method from INRA tables (Baumont et al., 2007). Goats were fed *ad libitum* with a total mixed ration offered individually twice daily after milking in the proportion of two thirds at 1600 h and one third at 0800 h according to the intervals between milkings. Quantities of feed offered were adjusted weekly to ensure 10 % refusals.

2.3. Weight, production and sorting behaviour

Animals were weighed weekly. Offered and refused feeds were individually weighed daily, which allowed for assessment of dry matter intake (**DMI**) using the dry matter percentage of the diet that was estimated weekly from water content (ISO, 1983). Daily DMI per kilogram of body weight (**DMIBW**) was calculated using the BW of the previous week. Raw milk yield (**RMY**) was recorded 5 days out of 7. Samples of offered and refused feeds were taken at the end of P2, P3 and P4 and after two weeks of yeast supplementation during P3. The following analyses were performed on feedstuffs using standard methods: ash (ISO, 1978), crude protein (CP) (ISO, 1997) and starch (AFNOR, 1997). Cell wall content was estimated by the neutral detergent fibre method of Van Soest and Wine (1967) as modified by Giger et al. (1987). Lignocellulose (ADF) and lignin (ADL) were obtained using a sequential approach on the NDF residue (Giger et al., 1987). The ratio between fibre percentage ingested and fibre percentage in the diet was calculated.

2.4. Time-budget measurement

Time-budget of the goats was analysed using six video cameras which recorded two goats at any one time. Cameras were fitted to the ceiling above the individual pens and linked to a quad splitter allowing cyclic sequences and to a time-lapse video recorder. Nycthemeral activity of the goats was recorded during the last two weekends of each period. Six light-bulbs (15 W) were also fitted to the ceiling above the individual pens to allow video observation during the night. Twenty-four hours, from the end of the afternoon milking to the start of the next afternoon milking, were analysed during each of the recorded weekends by scan sampling of five seconds every two minutes using The Observer software (version 5.0, 2004, Noldus Information Technology, The Netherlands). The calculated variables were: time spent standing, lying, curled up (Fig. 2), ruminating, eating and idling. Postures and activities were recorded independently. Variables were recorded for the 15 h following the evening feed and during the 6 h following the morning feed. The time preceding milking (around 1 h) was not

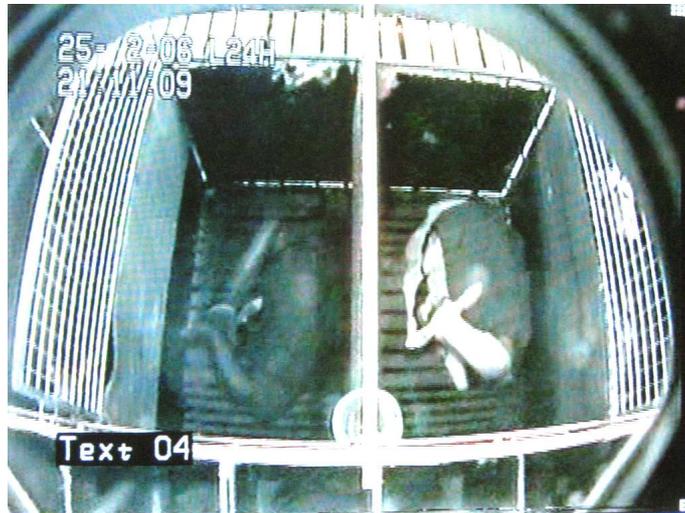


Fig. 2. Picture from a camera showing two curled up goats with coats and harness.

included because goats were very nervous and observations were considered less reliable. Milking lasted for approximately 30 min. All recorded data were merged to obtain an estimation of daily time budget throughout the day (21 h). Variables were also analysed by intervals of 2 h (10 intervals) to study the nycthemeral repartition of activities.

2.5. Continuous measurements

In the week prior to the beginning of the experiment each goat was accustomed to wearing a coat covering its back and maintained by individually adjusted elastic straps and leather halter especially made for goats enabling individual adjustment for each animal.

2.5.1. pH measurement

Rumen pH was measured every minute by a self cleaning pH probe (accuracy = 0.01 pH, Fisher Bioblock Scientific, France) fitted in the rumen through the ruminal cannulae and linked to a portable device (Easy Log EL-2, Omega engineering. inc) (Brossard et al., 2003) placed in one of the coat pockets. A 300 g weight was attached to each probe to reduce its mobility in the rumen. Daily mean and minimum pH were calculated. Due to numerous technical problems for continuous recording of rumen pH, only the days with at least 21 h of measurements were used in the analysis.

2.5.2. Intake and meal definition

Intake was recorded by weighing devices fitted under the feed trough. This system recorded the weight of feed within the trough every two minutes and allowed simultaneous recording of the twelve goats. Data were downloaded every two or three days. Meals were determined from this data using the following method. Goats were assumed to be eating if more than 0.05 g DMIBW was eaten in one minute. The start of a meal was defined as no intake in the preceding 20 min and at least one other intake bout during the following 20 min. The end of a meal was defined as a period of 20 min in which no intake was recorded, as defined by Abijaoudé et al. (2000c) on dairy goats. A new meal was considered to have started after each feeding regardless of previous conditions. All meals lasting less than 10 min and showing less than 1 g DMIBW were considered as nibbling.

2.5.3. Chewing activity

Chewing was recorded using an automatic system (APEC) adapted from the one used by Brun et al. (1984) and placed in another coat pocket. APEC data files were analysed by specific software written at INRA Theix (France) classifying periods of chewing activity as rumination, intake or nibbling. The software also calculated the number of rumination boli for each period of rumination. Time to rumination after feed was calculated according to the feeding time recorded with the weighing machines. When the main meal duration was available, the time to rumination after the end of the afternoon main meal was calculated. Mean number of periods of rumination per day, mean duration of daily periods of rumination and mean number of boli per period of rumination were also calculated.

2.6. Detection of off-feed periods due to acidosis

Daily changes in DMIBW and RMY were used to detect off-feed periods related to bouts of acidosis. Firstly, for each goat days with a DMIBW or RMY not included in the interval mean $\pm 1.5 \times \text{SD}$ (both calculated for each goat) were selected. Secondly, days with a drop in DMIBW between two consecutive days greater than 10 g / kg BW were selected. Thirdly, days with a mean pH lower than 6.0 were also selected. Finally, a goat was considered as experiencing a perturbation if at least two parameters out of pH, DMIBW and milk yield were selected at the same time or during at least two consecutive days. The end of a bout of acidosis was determined by the last selected day. Selected days were encoded “1”, other days “0” and these off-feed periods will be called bouts of acidosis throughout the manuscript.

2.7. Statistical analysis

Only data from the second week of P1 were analyzed because the first week allowed for animals adaptation to housing environment. Transition weeks were not included in the analysis. When a goat lost its cannula, this day and the next one were not included in the analysis, and data from the following days discarded until at least 90 % of previously recorded DMI was reached.

Statistical analyses were carried out by the generalized linear model procedure using Minitab (Version 12.2, 1998, Minitab Inc.). They were performed with the same basic model including fixed effects of group and goat nested into the group, a covariate for time (day or week), a covariate for acidosis and the interaction between time and group, which was

removed when non significant. A covariate for diet was added to this basic model to analyse the effect of the diet during periods P1, P2, P4 and P5. The analysis of the effect of yeast was carried out in two steps. Firstly, a covariate for carry over effect was added to the basic model to test the carry over effect of yeast between periods P2 and P4. Secondly, if the carry over effect of yeast during P4 was not significant, the effect of yeast was tested, using a covariate added to the basic model, on periods P2, P3 and P4, otherwise it was tested only on periods P2 and P3.

For time-budget analysis, data for one goat over one day were excluded from the analysis as this animal spent 82 % of the total 21 h standing and 14 % lying. Influence of bouts of acidosis on sorting behaviour was not tested because only two measurements were performed during a bout of acidosis.

3. Results

One of the goats from the Y group died very shortly after the period of yeast supplementation (beginning of P4). Consequently data from this animal during P4 were discarded from the analysis. The analyses of the main meal and first secondary meal, and the analyses of the time to rumination are only presented for the afternoon feed because of the greater proportion (2/3) of total feed offered in the afternoon.

Daily DMIBW decreased when goats were offered H compared to L ($P < 0.001$). Intake and production analyses, using specific encodings, are presented elsewhere (Desnoyers et al., unpublished data). Ten of the twelve goats presented at least one bout of acidosis and 4.7 % of days were encoded as acidosis when goats were offered L whilst 11.6 % of days were encoded as acidosis when goats were offered H. These percentages are however calculated regardless of parameter. Since all parameters were not measured every day, the proportion of days encoded as acidosis may be slightly different according to the parameter.

3.1. Time-budget

3.1.1. Daily observations

Table 2 presents the influence of diet and bouts of acidosis. Goats spent less time ruminating per gram of DMIBW when offered H compared to L ($P = 0.001$) but the percentage of time spent eating per gram of DMIBW was not influenced by diet ($P > 0.1$). Goats spent less time ruminating ($P = 0.002$) but more time idling ($P = 0.02$) when offered H

compared to L. Offering H did not influence percentage of time spent standing, lying or curled up ($P > 0.1$). Intake duration was neither influenced by diet nor bouts of acidosis ($P > 0.1$). Goats experiencing bouts of acidosis spent more time eating per gram of DMIBW ($P < 0.001$) but this did not affect time spent ruminating per gram of DMIBW ($P > 0.1$). They also spent less time ruminating and more time idling ($P < 0.001$ for both behaviours) than when not experiencing bouts of acidosis. Bouts of acidosis decreased time spent drinking ($P = 0.009$) but did not influence time spent standing or lying ($P > 0.1$) although time spent curled up increased ($P = 0.03$).

Table 3 presents the effects of yeast supplementation and bouts of acidosis. A carry over effect of yeast supplementation was observed for the percentage of time spent idling ($P = 0.008$), which was increased in the Y group after the end of yeast supplementation. Yeast supplementation also tended to have a positive carry over effect on time spent eating per gram of DMIBW ($P = 0.076$). Yeast supplementation did not influence time spent eating or ruminating per gram of DMIBW ($P > 0.1$). Only the percentage of time spent drinking tended to be increased by yeast supplementation ($P = 0.06$). Acidosis again increased time spent eating per gram of DMIBW ($P = 0.003$) but not time spent ruminating per gram of DMIBW. Acidosis decreased the percentage of time spent ruminating and increased the percentage of time spent idling ($P < 0.001$). No influence was observed for the other parameters ($P > 0.1$).

3.1.2. Nycthemeral patterns

Fig. 3 shows the effects of diet and acidosis. Goats spent less time eating 2 h after the morning feed when offered H compared to L ($P = 0.03$) but more time eating in the following interval ($P = 0.01$). Intake duration was not influenced by diet during any other interval. When offered H goats spent less time ruminating during the night than when offered L (from 8 h after the afternoon feed until the morning one, $P < 0.01$). In contrast, they spent more time ruminating during the first interval following the morning feed ($P < 0.01$). No influence of diet on rumination was observed during any other interval. Bouts of acidosis decreased time spent eating during the intervals which included feeds ($P = 0.02$ and $P < 0.001$; for evening and morning feeds, respectively). Bouts of acidosis decreased the time spent ruminating during the night (from 8 h after the afternoon feed until the morning one, $P < 0.01$) and during the morning (from 2 h after the morning feed to the afternoon one, $P = 0.006$ and $P = 0.04$, respectively). Nycthemeral repartition of standing and lying postures are not presented as figures. No effect of the diet was detected on the time spent standing or lying regardless of interval ($P > 0.1$). Bouts of acidosis increased time spent curled up during the interval which

Table 2

Effects of feeding a low (L, 20 %) or high (H, 50 %) concentrate diet and of bouts of acidosis on the time-budget of the goats

	n ^a	Diet			Acidosis		rmse
		L	H	<i>P</i>	coef. ^b	<i>P</i>	
Intake and rumination							
DMIBW (g/kg)	942	42	40.6	***	-6.7	***	3.48
Intake ^c (min/g DMIBW)	98	7.3	7.7	NS	+ 3.3	***	1.42
Rumination ^d (min/g DMIBW)	98	9.7	8.5	**	+ 0.4	NS	1.69
Activities (% of 21 h observed)							
Intake	99	23.6	23.7	NS	- 0.8	NS	3.98
Rumination	99	28.9	25.4	**	- 9.6	***	4.85
Idling	99	26.7	29.9	*	+ 13.2	***	5.86
Drinking	99	0.9	1.0	NS	- 0.4	**	0.43
Postures (% of 21 h observed)							
Standing	98	56.0	56.1	NS	- 0.3	NS	7.34
Lying	98	40.0	39.13	NS	- 1.5	NS	6.59
Curled up	98	1.9	2.6	NS	+ 2.1	*	2.54

^a number of observations

^b estimated coefficient of the covariable Acidosis

^c one observation (32 min/g) during a bout of acidosis was discarded to ensure normal distribution of the residues

^d one observation (23 min/g) during a bout of acidosis was discarded to ensure normal distribution of the residues

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

Table 3

Carry over effect of yeast supplementation, effects of yeast supplementation and of bouts of acidosis on the time-budget of the goats

	n ^a	Carry over		Yeast			Acidosis		rmse
		Coef. ^b	P	C	Y	P	Coef. ^b	P	
Intake and rumination									
DMIBW (g/kg)	1009 (647)	-1.0	†	41.1	41.5	NS	-6.9	***	3.33
Intake ^c (min/g DMIBW)	91 (66)	1.2	†	8.7	8.8	NS	1.6	**	1.21
Rumination ^d (min/g DMIBW)	124 (66)	-0.7	NS	8.6	7.9	NS	0.3	NS	1.52
Activities (% of 21 h observed)									
Intake	125 (67)	2.3	NS	23.1	22.2	NS	-0.5	NS	3.46
Rumination	125 (67)	-1.2	NS	25.6	24.7	NS	-7.2	***	4.86
Idling	92 (67)	24.6	**	33.2	34.5	NS	9.7	***	5.37
Drinking	125 (67)	0.2	NS	1.0	1.2	†	-0.2	NS	0.45
Postures (% of 21 h observed)									
Standing	124 (66)	2.0	NS	50.9	49.3	NS	-3.2	NS	6.65
Lying	124 (66)	-2.2	NS	43.5	44.7	NS	2.0	NS	5.88
Curled up	124 (66)	0.2	NS	2.6	3.0	NS	1.2	NS	2.69

^a number of observations for yeast effect analyses (for carry over effect analyses)

^b estimated coefficient of the corresponding covariable (acidosis or carry over)

^c one observation (15 min/g) during a bout of acidosis was discarded to ensure normal distribution of the residues

^d one observation (23 min/g) during a bout of acidosis was discarded for carry over analysis to ensure normal distribution of the residues

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

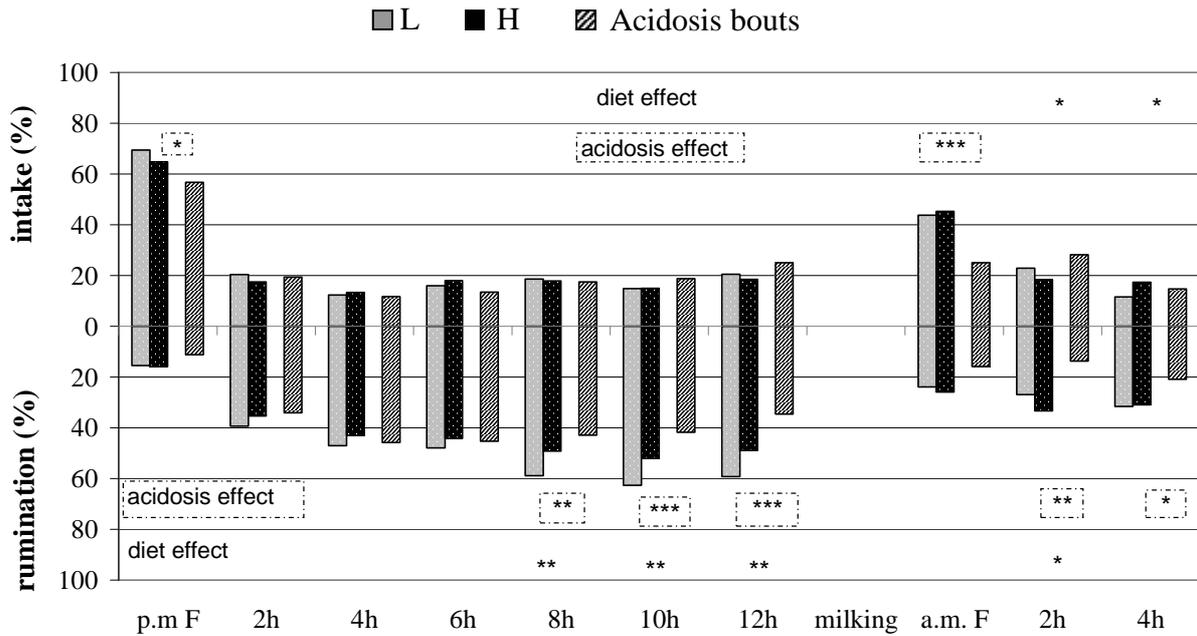


Fig. 3. Effects of feeding a low (L, 20 %) or high (H, 50 %) concentrate diet and of bouts of acidosis (estimated coefficients) on the percentage of the 2 h intervals spent eating and ruminating. Interval starting times are indicated below (p.m. F and a.m. F: afternoon and morning feeds respectively).

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

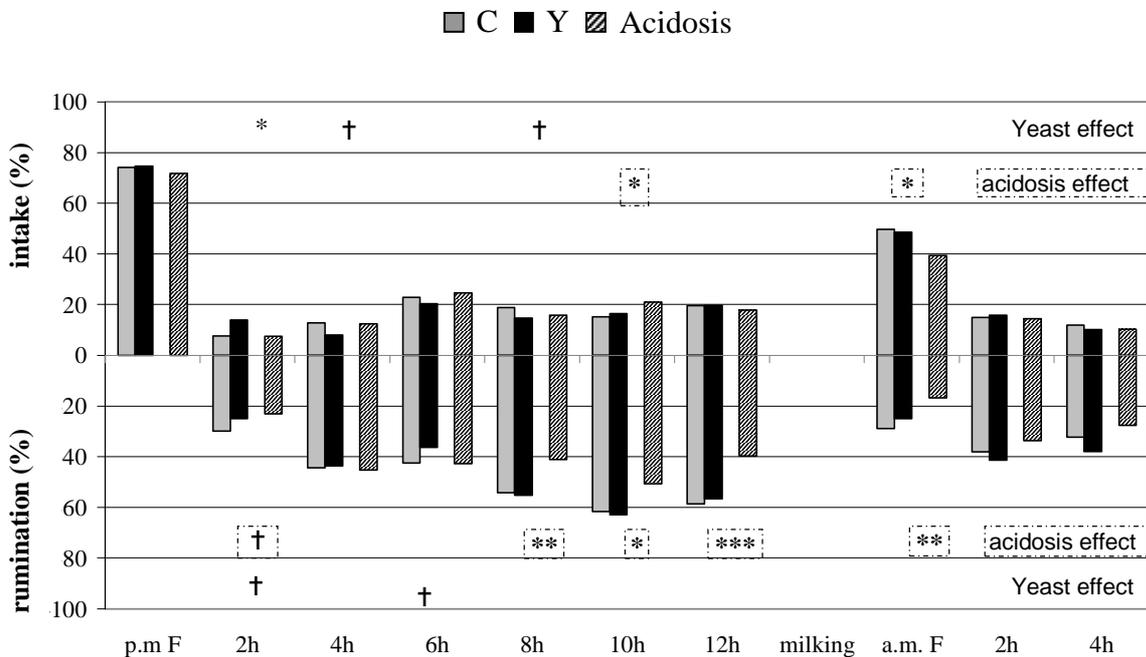


Fig. 4. Effects of yeast supplementation (control (C) vs Yeast (Y)) and of bouts of acidosis on the percentage of the 2 h intervals spent eating and ruminating. Interval starting times are indicated below (p.m. F and a.m. F: afternoon and morning feeds respectively).

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

included the afternoon feed ($+ 5 \pm 1.5 \%$, $P = 0.001$), 4 h after the afternoon feed ($+ 8 \pm 1.8 \%$, $P < 0.001$) and during the interval which included the morning feed ($+ 4 \pm 1.7 \%$, $P = 0.03$).

Fig. 4 shows the effect of yeast supplementation and bouts of acidosis. Yeast supplementation increased the percentage of time spent eating during the interval following the afternoon feed ($P = 0.05$) and tended to decrease it during the intervals starting 4 h and 8 h after the afternoon feed ($P = 0.07$ for both intervals). No influence of yeast supplementation was found for either eating or rumination during the remaining intervals ($P > 0.1$). Bouts of acidosis tended to decrease rumination during the interval following the afternoon feed ($P = 0.09$) and during the interval starting 6 h after the afternoon feed ($P = 0.06$). Bouts of acidosis increased time spent eating during the night (interval starting 10 h after the afternoon feed, $P = 0.04$) and decreased it during the interval including the morning feed ($P = 0.04$). Bouts of acidosis tended to decrease the percentage of time spent ruminating during the interval following the afternoon feed ($P = 0.08$) and decreased it during the night from 8 h after the afternoon feed up to and including the morning feed ($P < 0.01$). No influence of bouts of acidosis was found during the remaining intervals. Nycthemeral repartition of standing and lying postures are not presented as figures. Yeast supplementation increased the percentage of time spent standing during the first interval following the afternoon feed (34 ± 9.5 and $50 \pm 9.5 \%$, for the Y and C groups, respectively; $P = 0.002$; $\text{rmse} = 19.8$) and decreased it during the first interval following the morning feed (64 ± 11.3 and $50 \pm 11.3 \%$ for the Y and C groups, respectively; $P = 0.02$; $\text{rmse} = 23.8$). As a consequence yeast supplementation decreased percentage of time spent lying during the first interval following the afternoon feed (63 ± 9.3 and $48 \pm 9.3 \%$ for the Y and C groups, respectively, $P = 0.003$; $\text{rmse} = 19.5$) and increased it during the interval following the morning feed (33 ± 10.6 and 46 ± 10.6 for the Y and C groups, respectively; $P = 0.03$; $\text{rmse} = 22.2$). The percentage of time spent curled up was only influenced by yeast supplementation during the interval following the morning feed. It was greater for yeast supplemented goats than for control ones (4 and 1 %, respectively; $P = 0.04$; $\text{rmse} = 5.4$). Bouts of acidosis increased time spent curled up during the afternoon feed ($+ 3.6 \pm 1.2 \%$; $P = 0.004$) and tended to increase it during the following interval ($+ 2.3 \pm 1.4 \%$, $P = 0.09$). No influence of yeast or acidosis was detected during all other intervals.

3.2. Intake

Goats ate a less fibrous diet than the one offered when they were yeast supplemented while non supplemented goats ate a diet with a proportion of fibre similar to the offered one. This result was similar when testing NDF, ADF or ADL (Fig. 5; $P < 0.001$).

With our meal definition, 91 ± 7.6 % of the total daily DMIBW was eaten during the meals. Daily intake rate (**DIR**, g DMIBW / min) was positively correlated to the intake rate of the afternoon main meal (**MMIR**, g DMIBW / min; $\text{DIR} = 3.9 + 0.4 \text{ MMIR}$, $R^2 = 0.45$, $n = 532$) but not to the intake rate of the first secondary meal.

The minimum value of rumen pH reached between the afternoon and the morning feeds was negatively correlated with DIR ($\text{minpH} = 6.15 - 0.096 \text{ DIR}$, $R^2 = 0.29$, $n = 179$). It was also negatively correlated with the main meal DMIBW (**MMDMI**; $\text{minpH} = 5.66 - 0.02 \times \text{MMDMI}$, $R^2 = 0.19$, $n = 179$) and to the main meal duration (**MMD**; $\text{minpH} = 5.56 - 0.003 \times \text{MMD}$, $R^2 = 0.11$, $n = 179$).

Table 4 shows the effect of diet on the number of meals, their duration, and the intake rate. These parameters are presented only for the main meal following the afternoon feed and for the first secondary meal after this main meal because no effect of diet was detected for other secondary meals. Daily intake rate was greater with L compared to H ($P = 0.001$). H also tended to increase DMIBW of the first secondary meal ($P = 0.08$). No effect of diet was observed on all other parameters ($P > 0.1$). Bouts of acidosis influenced all parameters with the exception of the duration of the first secondary meal ($P > 0.1$). Bouts of acidosis decreased the number of meals per day ($P = 0.03$) and daily intake rate ($P < 0.001$). It also decreased the MMD ($P = 0.002$), MMDMI ($P < 0.001$) and MMIR ($P = 0.004$). It increased the time between the end of the main meal and the first secondary meal ($P < 0.001$) and decreased DMIBW ($P = 0.003$) and intake rate during the first secondary meal ($P = 0.001$).

A positive carry over effect of yeast supplementation was only observed for the afternoon MMIR ($P = 0.007$). No effect of yeast supplementation was observed on daily intake rate. Yeast supplementation did not influence the number of meals per day, daily intake rate, or the first secondary meal parameters ($P > 0.1$). It increased the afternoon MMD (75 vs 87 min for the C and Y groups, respectively, $P = 0.04$, $\text{rmse} = 0.58$) and the MMDMI (17.6 vs 19.4 g/kg BW for the C and Y groups, respectively, $\text{rmse} = 4.91$).

3.3. Rumination

Table 5 shows the effect of diet and bouts of acidosis. Feeding H or L did not influence the time to rumination after the afternoon feed or after the end of the afternoon main meal ($P > 0.1$). It also did not influence the mean number or duration of periods of rumination or the mean number of boli per period of rumination ($P > 0.1$). Bouts of acidosis did not influence the time to rumination after the afternoon feed ($P > 0.1$) but increased the time to rumination after the end of the afternoon main meal ($P = 0.02$). Bouts of acidosis decreased mean number of rumination periods ($P = 0.02$), mean number of boli per periods of rumination ($P = 0.02$) and tended to decrease the mean duration of rumination periods ($P = 0.08$).

No carry over effect of yeast was observed for all rumination parameters ($P > 0.1$). Table 6 shows the effect of yeast supplementation and bouts of acidosis. Yeast supplementation increased the time to rumination following the afternoon feed ($P = 0.02$) without influencing the time to rumination after the end of the main meal ($P > 0.1$). Yeast supplementation did not influence the mean number or duration of rumination periods, or the mean number of boli per rumination period ($P > 0.1$). Bouts of acidosis did not influence time to rumination following the afternoon feed or the end of the afternoon main meal ($P > 0.1$) and decreased the mean number of periods of rumination ($P = 0.03$), the mean number of boli per rumination period ($P = 0.052$) and tended to decrease the mean duration of periods of rumination ($P = 0.08$).

4. Discussion

Regardless of the diet offered, goats spent more time ruminating than eating, which is in accordance with some observations in lactating goats (Kawas et al., 1991) but not with others (Abijaoudé et al., 2000b; Rapetti et al., 2005). The majority of intake occurred during the day with two intake peaks after milking and feeding and the majority of rumination occurred during the night and morning. This is in accordance with the review by Beauchemin et al. (1990). However, regardless of the offered diet goats spent at least some time eating and ruminating during every 2 h interval. With our definition of meals 91 % of the total daily DMIBW was eaten during meals, which confirms the reliability of the definition. DIR was positively correlated to intake rate of the afternoon main meal but not to the intake rate of the first secondary meal following the afternoon main meal. Moreover, the minimum rumen pH

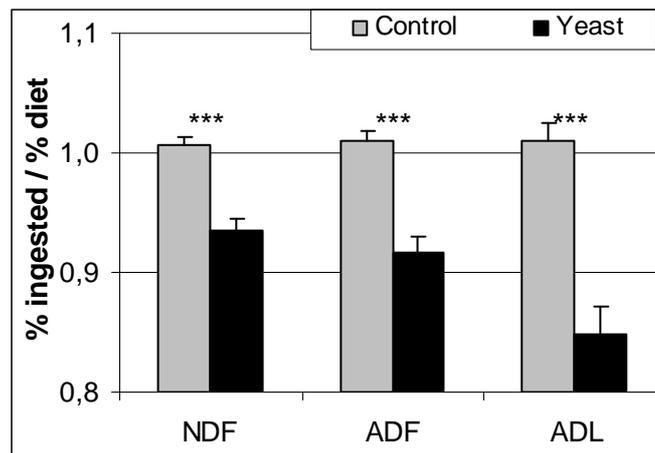


Fig. 5. Ratio between the percentage of NDF, ADF or ADL ingested and the percentage of NDF, ADF or ADL of the offered diet for yeast supplemented (Yeast) or control animals.

Table 4

Effects of feeding a low (L, 20 %) or high (H, 50 %) concentrate diet and of bouts of acidosis on intake characteristics

	n ^a	Diet			Acidosis		rmse
		L	H	P	Coef. ^b	P	
Daily parameters							
Number of meals	330	5.7	6.0	NS	-0.9	*	1.98
Intake rate ^c (g/min)	330	1.04 (10.1)	1.01 (9.2)	**	-0.12 (-0.2)	***	0.08
Afternoon main meal							
Duration ^c (min)	330	1.84 (69)	1.81 (65)	NS	-0.13 (-0.3)	**	0.49
DMI ^b (g/kg BW)	330	1.22 (15.5)	1.18 (14.0)	NS	-0.31 (-0.26)	***	0.19
Intake rate ^c (g/min)	330	1.17 (13.8)	1.15 (13.1)	NS	-0.22 (-0.4)	*	3.39
First secondary meal							
Time to meal ^{cd} (min)	321	2.00 (100)	1.99 (96)	NS	0.25 (0.8)	***	0.23
Duration (min)	321	34.2	38.3	NS	-6.6	NS	24.94
DMI (g/kg BW)	321	3.7	4.4	†	-1.7	**	2.79
Intake rate ^c (g/min)	321	0.84 (6.0)	0.87 (6.4)	NS	-0.08 (-0.17)	**	0.12

^a number of observations for yeast effect analyses

^b estimated coefficient of the covariable Acidosis

^c log(1+X) transformed data with backtransformed data in brackets

^d time between the end of the afternoon main meal and the first secondary meal.

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

Table 5

Effects of feeding a low (L, 20 %) or high (H, 50 %) concentrate diet and of bouts of acidosis on times to rumination and characteristics of rumination bouts

	n ^a	Diet			Acidosis		rmse
		L	H	P	Coef. ^b	P	
Time to rumination							
after feed ^c (min)	247	1.9 (78)	1.8 (72)	NS	0.01 (2)	NS	0.32
after main meal ^c (min)	84	1.7 (38)	1.5 (32)	NS	0.4 (3.7)	*	0.50
Rumination periods							
Number ^d	146	33	30	NS	-4	*	6.22
Mean duration ^e (min)	145	17	16	NS	-1	†	2.51
Mean number of boli ^{c,e}	145	1.27 (19.7)	1.25 (18.6)	NS	-0.04 (-2.10)	*	0.06

^a number of observations for yeast effect analyses

^b estimated coefficient of the covariable Acidosis

^c log(1+X) transformed data with back transformed data in brackets

^d two observations were discarded to ensure normal distribution of the residues

^e two observations were discarded to ensure normal distribution of the residues

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

Table 6

Effects of yeast supplementation and of bouts of acidosis on times to rumination and characteristics of rumination bouts

	n ^a	Yeast effect			Acidosis		rmse
		C	Y	P	Coef. ^b	P	
Time to rumination							
after feed ^c (min)	364	1.8 (71)	12.0 (95)	*	-0.06 (-1.9)	NS	0.32
after main meal ^c (min)	120	1.6 (40)	1.4 (23)	NS	0.2 (2.6)	NS	0.53
Rumination bouts							
Number ^d	194	29	28	NS	-4	*	7.54
Mean duration ^e (min)	194	16	16	NS	-1	†	2.51
Mean number of boli ^{c,e}	194	1.26 (19)	1.26 (19)	NS	-0.03 (-1.9)	*	0.06

^a number of observations for yeast effect analyses

^b estimated coefficient of the covariable Acidosis

^c two observations were discarded to ensure normal distribution of the residues

^d Two observations were discarded to ensure normal distribution of the residues

^e log(1+X) transformed data with back transformed data in brackets

NS $P > 0.10$; † $P < 0.10$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

reached between the afternoon and the morning feed was correlated to the afternoon main meal DMIBW and duration. These results confirm that the characteristics of the afternoon main meal are the ones which influence ruminal fermentation the most.

The lack of influence of the diet on the percentage of time spent eating contradicts previous findings in goats (Focant, 1984; Kawas et al., 1991; Carvalho et al., 2006) which showed a decrease in intake duration when the percentage of concentrate increased from approximately 20 % to more than 50 %. Despite the similar daily durations of intake observed between the two diets, the shorter intake duration observed during the interval following the morning feed with H compared to L might be due to the higher concentrate percentage of H, which probably induced a faster and more intense fermentation in the rumen and earlier satiety (Allen, 2000; Forbes, 2007). However, only one third of the total feed was offered during the morning feed and the same result would have been expected following the afternoon feed, which was not the case. The lack of dietary effect during the other intervals and the very little influence of diet on meal parameters is not in agreement with the findings of Abijaoudé et al. (2000a) who observed an increase in the total number of meals and a decrease in main meal duration in goats when the proportion of concentrate within the diet increased from 45 to 70 %. These results are however in agreement with the similar daily intake duration observed between the two diets and with the nyctemeral repartition of eating. The daily intake rate was the only parameter influenced by diet. However, this is not in accordance with the results of Abijaoudé et al. (2000c) and with the observation that more fibrous diets usually lead to lower intake rates than less fibrous ones. However, the lower intake rate with H compared to L might be due to a greater sorting of the TMR, but this assumption cannot be confirmed because sorting behaviour was only measured with H. The decrease in percentage of time spent ruminating with H compared to L agrees with previous observations in goats (Focant, 1984; Kawas et al., 1991; Carvalho et al., 2006), however these authors also observed a decrease in intake duration. The increased idling time is likely to be a consequence of the decrease in rumination duration, which was mainly due to decreases in rumination time during the night (midnight to the morning milking). This is not in agreement with the results of Focant (1984) and Desnoyers *et al.* (in press) showing that in goats increasing the proportion of concentrate in the diet from 20-30 % to 60-80 % leads to a decrease in rumination time mainly during daylight hours. This may be due to the light-bulbs used for video recording. Indeed, Jarrige *et al.* (1995) observed a disappearance of the 24 h rhythm with cows reared under continuous light, and the appearance of a 12 h rhythm based on the two daily feedings. Thus the potential stimulation of rumination by darkness (Focant,

1984; Jarrige et al., 1995) could have been limited during this experiment. However, because rumination is also stimulated by the fibre content of the rumen (Welch and Smith, 1971), this might be due to the low fibre content of H. Focant (1984) and Jarrige et al. (1995) observed that the decrease in rumination duration with less fibrous diets when compared to fibrous ones was related to fewer periods of rumination without any influence on rumination period duration. In the present experiment the decreased rumination duration with H compared to L was not linked to fewer or shorter rumination periods, even if these parameters were numerically lower with H compared to L. Little influence of the proportion of concentrate in the diet was observed in the present experiment, which was unexpected. However, analysis of rumen pH (Desnoyers et al., unpublished data) showed that both diets induced acidosis even if H induced more bouts of acidosis than L. When offered L goats might have already adapted their behaviour to acidosis, which might explain why no large differences were found whilst offering a more acidogenic diet. Furthermore, less data were available during P1 than during other periods because this period included the period of adaptation to experimental devices. Consequently, most of the data from L were recorded during P5 and a carry over effect of the previous periods with H, or a long term effect of the goat adaptation to H might have confounded the analysis.

Yeast supplementation also had little influence on goat feeding behaviour. With the exception of the work of Bach *et al.* (2007), no other papers detailing the effects of yeast supplementation on feeding behaviour were found. The greater percentage of time spent drinking for supplemented goats might be due to the less fibrous diet eaten by these animals when compared to the diet offered and to the diet eaten by control goats. This sorting behaviour may have induced an increase in the rate of fermentation in the rumen and in the osmolarity of rumen content (Elam, 1976), which in turn might have increased water intake. This result however has to be confirmed as scan sampling techniques are less precise for measuring behaviours of short duration than those of a longer duration (Mitlöhner et al., 2001) and because the time spent drinking might not be correlated with water intake. Even if the total duration of intake and rumination were not influenced by yeast supplementation, the increased intake duration observed during the 2 h interval following the afternoon feed confirms the later end of the afternoon main meal, and explains the decrease in the percentage of time spent ruminating during this interval. These results are not in accordance with those of Bach *et al.* (2007) who reported no difference in meal length or meal size in yeast supplemented cows. Definition of meal and feed management was however not similar between the two experiments and the comparison may not be reliable. The similar time to the

first period of rumination after the end of the afternoon main meal showed that consuming a longer and larger main meal did not influence the time to ruminate or to start a new meal. The lack of effect of yeast supplementation on daily intake rate was unexpected taking into account the greater sorting performed by supplemented goats. However, this sorting was maybe not important enough to induce a significant decrease in daily intake rate. In conclusion, supplemented goats seemed to be able to cope with higher concentrate diets because they chose to sort their diet without any major influence on other measured parameters, but these results have to be confirmed by further experiments.

Bouts of acidosis decreased daily DMIBW without decreasing the daily duration of intake. This decrease in daily DMIBW results from our encoding. However this led to an increase in the index of mastication, which allowed a greater supply of buffer into the rumen during bouts of acidosis. Even if the decreased eating time as a consequence of bouts of acidosis during the intervals including feeding was not confirmed with the yeast effect analysis for the afternoon feed, it is in agreement with the decrease in the afternoon MMD and MMDMI during bouts of acidosis. Since bouts of acidosis also decreased the total number of meals and the intake rate, goats experiencing acidosis seemed to show a higher level of satiety or an aversion towards the diet. This might also indicate that goats experiencing acidosis spent a long time sorting their TMR, maybe searching for more fibre in order to limit rumen pH decrease. However, we cannot conclude on this last hypothesis. Daily duration of idling increased during bouts of acidosis as a consequence of the decrease in daily duration of rumination. This decrease happened mainly during the night and the morning, which is not in agreement with results of Focant (1984). The total decrease in rumination duration during acidosis was due to a decrease in both the number and duration of all periods of rumination. This modification of rumination parameters is certainly due to the lower DMI observed during bouts of acidosis when compared to non-acidotic periods, and thus to the lower amount of matter in the rumen. This is confirmed by the lack of differences in rumination duration per gram of DMIBW during bouts of acidosis compared to non acidotic days. The shorter time spent drinking during bouts of acidosis might be related to the decrease in DMI. However, because acidosis usually leads to an increase in ruminal osmolarity (Elam, 1976), an increase in the percentage of time spent drinking could have been expected. As already stated, time spent drinking may not be correlated with the amount of water drunk and scan sampling techniques are less precise for behaviours of short duration than those of long duration (Mitlöhner et al., 2001). No literature was found regarding the curled up position, but healthy goats are very rarely seen curled up during daylight. The percentage of time spent in this posture during bouts of

acidosis increased especially during the afternoon feed and the following interval, thus when healthy goats are usually eating. This suggests an aversion towards the diet and confirms that this posture might be a sign of discomfort or disease when observed during daylight hours.

The perturbations induced by acidosis were far more pronounced than the effects of yeast supplementation or diet composition. This shows that when studying the effects of yeast supplementation, diet or any other experimental parameter in experiments using high concentrate diets, bouts of acidosis have to be taken into account to avoid confounding effects. Furthermore, the greater effect of bouts of acidosis compared to the effects of other parameters may partly explain the high variability observed between and within experiments using high concentrate diets, and the high variability observed between experiments dealing with yeast supplementation in high yielding ruminants fed high concentrate diets.

5. Conclusion

The effects of bouts of acidosis on feeding behaviour were far more pronounced than the effects of yeast supplementation or the proportion of concentrate in the diet. This indicates that experiments dealing with high concentrate diets have to be analysed very carefully allowing for the occurrence of acidosis to avoid potentially confounding effects.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge Alltech Inc. (Lexington, KY) for their financial support to this project, A. Aymard, G. Chevallier, O. Dhumez, G. Durandet, M. Langot, P. Piquerel, A. Severin, and J. Tessier for their technical assistance during the experiment and Dr. D. Juniper for rereading the manuscript.

References

- Abd El-Ghani, A. A., 2004. Influence of diet supplementation with yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on performance of Zaraibi goats. *Small Rumin. Res.* 52, 223-229.
- Abijaoudé, J. A., P. Morand-Fehr, J. Tessier, P. Schmidely and D. Sauvant, 2000a. Diet effect on the daily feeding behaviour, frequency and characteristics of meals in dairy goats. *Livest. Prod. Sci.* 64, 29-37.

- Abijaoudé, J. A., P. Morand-Fehr, J. Tessier, P. Schmidely and D. Sauvant, 2000b. Influence of forage: concentrate ratio and type of starch in the diet on feeding behaviour, dietary preferences, digestion, metabolism and performance of dairy goats in mid lactation. *Anim. Sci.* 71, 359-368.
- Abijaoudé, J. A., P. Morand-Fehr, J. Tessier, P. Schmidely and D. Sauvant, 2000c. Contribution of main and secondary meals to the daily intake of stall-housed dairy goats in mid lactation. *Options mediterr., Ser. A* 52, 33-37.
- AFNOR, 1997. Aliments des animaux. Dosage de l'amidon. Méthode enzymatique. V18-121. 9
- Allen, M. S., 2000. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 83, 1598-1624.
- Bach, A., C. Iglesias and M. Devant, 2007. Daily rumen pH pattern of loose-housed dairy cattle as affected by feeding pattern and live yeast supplementation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 136, 146-153.
- Baumont, R., J. P. Dulphy, D. Sauvant, G. Tran, F. Meschy, J. Aufrère, J. L. Peyraud and P. Champciaux, 2007. Les tables de la valeur des aliments. In: Quae (Ed), Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoin des animaux-Valeurs des aliments. Tables INRA 2007, pp. 181-286.
- Beauchemin, K. A., R. G. Kachanosky, G. B. Schaalje and J. G. Buchanan-Smith, 1990. Characterizing rumination patterns of dairy cows using spectral analysis. *J. Anim. Sci.* 68, 3163-3170.
- Brossard, L., M. Fabre, C. Martin and B. Michalet-Doreau, 2003. Validation of continuous ruminal pH measurements by indwelling probes (poster). In: Conference of Gastrointestinal Function, Chicago. 25.
- Brun, J. P., S. Prache and G. Béchet, 1984. A portable device for eating behaviour studies. In: 5th european grazing workshop, Edimbourg, UK. 1-8.
- Carvalho, S., M. T. Rodrigues, R. H. Branco and C. A. F. Rodrigues, 2006. Comportamento ingestivo de cabras Alpinas em lactacao alimentadas com dietas contendo diferentes niveis de fibra em detergente neutro proveniente da forragem. *Rev. Bras. Zootec.* 35, 562-568.
- Chaucheyras-Durand, F. and G. Fonty, 2002. Yeasts in ruminant nutrition. Experiences with a live yeast product. *Kraftfutter* 85, 146-150.
- Desnoyers, M., C. Duvaux-Ponter, K. Rigalma, S. Roussel, O. Martin and S. Giger-Reverdin, in press. Effect of concentrate percentage on ruminal pH and time-budget in dairy goats. *Animal*
- Dulphy, J. P. and B. Carle, 1986. Activités alimentaires et méryciques comparées des bovins, des caprins et des ovins. *Reprod. Nutr. Dev.* 26, 279-280.
- Dulphy, J. P., B. Carle and C. Demarquilly, 1990. Quantités ingérées et activités alimentaires

- comparées des ovins, bovins et caprins recevant des fourrages conservés avec ou sans aliment concentré. I. Etude descriptive. *Ann. Zootech.* 39, 95-111.
- Elam, C. J., 1976. Acidosis in feedlot cattle: practical observations. *J. Anim. Sci.* 43, 898-901.
- Erasmus, L. J., P. M. Botha and A. Kistner, 1992. Effect of yeast culture supplement on production, rumen fermentation, and duodenal nitrogen flow in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 75, 3056-3065.
- Focant, M., 1984. Comportement alimentaire, rumination, fermentations réticulo-ruminales et acides gras volatils plasmatiques, comparés chez la chèvre et le mouton; influence du régime. *Reprod. Nutr. Dev.* 24, 239-250.
- Forbes, J. M., 2007. A personal view of how ruminant animals control their intake and choice of food: minimal total discomfort. *Nutr. Res. Rev.* 20, 132-146.
- Giger, S., P. Thivend, D. Sauvant, M. Dorléans and P. Journaix, 1987. Etude de l'influence préalable de différents traitements amylolytiques sur la teneur en résidu NDF d'aliments du bétail. *Ann. Zootech.* 36, 39-48.
- ISO, 1978. Animal Feedingstuffs. Determination of crude ash. ISO 5984. 6
- ISO, 1983. Animal Feedingstuffs. Determination of moisture and other volatile matter content. ISO 6496. 10
- ISO, 1997. Aliments des animaux. Détermination de la teneur en azote et calcul de la teneur en protéines brutes. Méthode Kjeldahl. ISO 5983. 9
- Jarrige, R., J. P. Dulphy, P. Faverdin, R. Baumont and C. Demarquilly, 1995. Activités d'ingestion et de rumination. In: Jarrige, R., Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.-H. Farce and M. Journet (Ed), *Nutrition des ruminants domestiques*, pp. 123-181.
- Jouany, J.-P., 2001. A new look at yeast cultures as probiotics for ruminants. *Feed Mix* 9, 17-19.
- Kawas, J. R., J. Lopes, D. L. Danelon and C. D. Lu, 1991. Influence of forage-to-concentrate ratio on intake, digestibility, chewing and milk production of dairy goats. *Small Rumin. Res.* 4, 11-18.
- Krause, K. M. and G. R. Oetzel, 2005. Inducing subacute ruminal acidosis in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 88, 3633-3639.
- Martin, C., L. Brossard and M. Doreau, 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *Prod. Anim.* 19, 93-108.
- Mitlöchner, F. M., J. L. Morrow-Tesch, S. C. Wilson, J. W. Dailey and J. J. McGlone, 2001. Behavioral sampling techniques for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 79, 1189-1193.
- Rapetti, L., L. Bava, A. Tamburini and G. M. Crovetto, 2005. Feeding behaviour, digestibility, energy balance and productive performance of lactating goats fed forage-based and forage-free diets. *Italian Journal of Animal Science* 4, 71-83.
- Robinson, P. H., 2002. Yeast products for growing and lactating dairy cattle: impacts on

- rumen fermentation and performance. In: XII International Meeting on milk and meat production in hot climates, Mexicali, Mexico, 3-4 october 2002. 12 p.
- Sauvant, D., F. Meschy and D. Mertens, 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *Prod. Anim.* 12, 49-60.
- Sauvant, D. and S. Giger-Reverdin, 2007. Empirical modelling by meta-analysis of digestive interactions and CH₄ production in ruminants. In: ISEP. Energy and Protein Metabolism and Nutrition. 561-562.
- Stella, A. V., R. Paratte, L. Valnegri, G. Cigalino, G. Soncini, E. Chevaux, V. Dell'Orto and G. Savoini, 2007. Effect of administration of live *Saccharomyces cerevisiae* on milk production, milk composition, blood metabolites, and faecal flora in early lactating dairy goats. *Small Rumin. Res.* 67, 7-13.
- Tremere, A. W., W. G. Merrill and J. K. Loosli, 1968. Adaptation to high concentrate feeding as related to acidosis and digestive disturbances in dairy heifers. *J. Dairy Sci.* 51, 1065-1072.
- Uhart, B. A. and F. D. Carroll, 1967. Acidosis in beef steers. *J. Anim. Sci.* 26, 1195-1198.
- Van Soest, P. J. and R. H. Wine, 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 50, 50-55.
- Vermorel, M., 1988. 3. Nutrition énergétique. In: Jarrige, R. (Ed), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, pp. 57-74.
- Welch, J. G. and A. M. Smith, 1971. Physical stimulation of rumination activity. *J. Anim. Sci.* 33, 1118-1123.

2. Une nouvelle méthode d'analyse des cinétiques d'ingestion par segmentation / classification. Application à l'acidose et à la supplémentation en levures

L'ingestion des ruminants a souvent été décrite en terme de repas dont l'analyse nécessite de déterminer des critères précis, et en particulier, l'intervalle minimum acceptable entre deux repas pour les considérer comme indépendants. Cet intervalle varie selon les auteurs et l'espèce considérée et plusieurs méthodes ont été proposées pour sa détermination

Objectifs

→ Mettre au point une méthode d'analyse simple des cinétiques d'ingestion cumulée au cours du temps à l'aide d'une technique de segmentation par détection de ruptures, suivie d'une classification des segments obtenus.

→ Appliquer cette méthode à l'étude des modifications des cinétiques d'ingestion pendant des épisodes d'acidose et lorsque les animaux sont supplémentés en levures.

Matériels et méthodes

Douze chèvres, en milieu de lactation, réparties en deux groupes, ont successivement reçu deux régimes plus ou moins riches en concentré (L : 20 % et H : 50 %). Les animaux ont d'abord reçu le régime L pendant 2 semaines, puis le régime H pendant 11 semaines, puis à nouveau le régime L pendant 3 semaines. La ration était distribuée deux fois par jour, à raison d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi. Après trois semaines de régime H, six animaux ont reçu quotidiennement 10 g de levures ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech) en deux apports égaux avant chaque distribution de ration. Les quantités ingérées ont été mesurées quotidiennement et la production laitière, cinq jours par semaine. Les crises d'acidose ont été codées en utilisant les chutes successives d'au moins deux des paramètres : pH, ingestion et production laitière.

L'ingestion cumulée entre chaque distribution était calculée à partir des enregistrements effectués toutes les 2 min par des balances situées sous les bacs d'alimentation. L'analyse a été réalisée en deux temps : une segmentation en k segments par détection de ruptures, suivie d'une classification des k segments dans 8 groupes selon la valeur de leur pente qui estime la vitesse d'ingestion dans le segment correspondant. Une ACP a été réalisée sur différents

paramètres obtenus par cette méthode (quantité ingérée, k , moyenne des pentes, aire sous les segments à 60, 120 et 180 min et un paramètre d'ajustement).

Résultats

L'axe 1 de l'ACP permet de différencier deux types de comportements d'ingestion, principalement caractérisés par le nombre de segments. L'axe 2 est principalement représenté par le facteur d'ajustement.

Cette méthode permet de montrer les différentes phases d'un repas, généralement caractérisé par une forte vitesse d'ingestion à son début, puis par une vitesse plus faible.

La supplémentation en levures a diminué le nombre de segments et a augmenté la durée de la première phase d'ingestion suivant la distribution de la ration.

Les cinétiques des animaux en crise d'acidose ont été caractérisées par une augmentation du nombre de segments et, donc, par une déstructuration de l'organisation de l'ingestion.

Discussion et conclusion

- Les segments obtenus par cette méthode ne sont pas toujours assimilables à des repas au sens strict du terme, dans la mesure où un repas peut être constitué de plusieurs segments et où un segment peut regrouper plusieurs petits repas.

- Les comportements alimentaires différenciés par cette méthode sont similaires à ceux déterminés par une analyse plus globale (chapitre 3.2) utilisant simultanément les durées d'ingestion et de rumination, ce qui confirme la pertinence de cette méthode de "segmentation/classification".

- Les différences de comportement observées lorsque les animaux sont supplémentés en levures ou lors des crises d'acidose sont cohérentes avec les observations réalisées avec des méthodes plus classiques d'analyse.

- Cette méthode d'analyse des cinétiques d'ingestion par segmentation / classification présente une nouvelle approche de l'analyse du comportement alimentaire par une méthode relativement simple et globale, qui ne nécessite pas la détermination des repas au sens strict du terme. Elle est également plus simple à mettre en œuvre d'un point de vue expérimental que celle utilisant les durées d'ingestion et de rumination issues de mesures obtenues à l'aide d'appareils portatifs.

**Méthode d'analyse des cinétiques d'ingestion par segmentation /
classification. Application à l'acidose et à la supplémentation en levures**

Desnoyers M.¹, Giger-Reverdin S.¹, Duvaux-Ponter C.¹ et Lebarbier E.²

¹ *UMR INRA-AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude Bernard 75005 Paris, France*

² *AgroParisTech, UMR INRA MIA 518, 16 rue Claude Bernard 75005 Paris, France*

Introduction

L'ingestion des ruminants a été souvent décrite en terme de repas (Heinrichs et Conrad, 1987 ; Masson *et al.*, 1989 ; Abijaoudé *et al.*, 2000a ; DeVries *et al.*, 2003), en terme de visites à des distributeurs automatiques de concentrés (Friggens *et al.*, 1998) ou en regroupant ces visites à des distributeurs automatiques en repas (Tolkamp *et al.*, 2002 ; Yeates *et al.*, 2002 ; Bach *et al.*, 2007). Un repas peut être défini par trois caractéristiques : sa *taille minimale* (g), la *durée maximale* (min) accordée pour son ingestion, ainsi que *l'intervalle minimal* (min) nécessaire pour considérer deux repas indépendants (Heinrichs et Conrad, 1987). Ces critères sont à adapter selon l'espèce, l'âge et le stade physiologique, et tous les épisodes d'ingestion qui ne rentrent pas dans ces critères sont considérés comme du grignotage (Heinrichs et Conrad, 1987). Le repas principal est caractérisé par sa longue durée et se situe juste après la distribution de nourriture pour les animaux nourris à l'auge (Abijaoudé, 1999). Les repas secondaires sont moins importants et sont intercalés entre les repas principaux (Abijaoudé, 1999). Les définitions des critères caractérisant les repas sont cependant variables selon les auteurs et selon les espèces. Pour des chèvres, Abijaoudé *et al.* (2000b) ont déterminé la fin d'un repas principal par au moins 20 min de repos masticatoire. Dans le cas de vaches laitières, Heinrichs et Conrad (1987) ont retenu, pour atteindre 90 à 95 % de l'ingestion au cours des repas principaux, une quantité minimale de 0,2 kg ingérés, une durée minimale de 2,5 min ainsi qu'un intervalle minimal de 8 min entre deux repas.

Tolkamp et Kyriazakis (1999) ont comparé cinq méthodes statistiques basées sur la distribution des intervalles de différentes durées, ou sa transformation par un logarithme, et permettant de déterminer l'intervalle maximal entre deux séquences d'ingestion pouvant être considéré comme une pause au sein d'un même repas. Allcroft *et al.* (2004) ont comparé trois types de modèles statistiques (le modèle de Markov caché, le modèle gaussien et le modèle de semi-Markov) qui permettent également de regrouper des séquences d'ingestion séparées par de courtes pauses en une période d'ingestion plus importante, et de différencier des périodes d'ingestion séparées par des pauses plus importantes. Deswysen *et al.* (1993) ont en revanche, analysé le comportement alimentaire de vaches laitières par la détermination de rythmes au sein du nyctémère en utilisant une transformation de Fourier. L'utilisation des méthodes évoquées nécessite de bonnes connaissances statistiques et n'est donc pas toujours aisée. De plus, la plupart de ces méthodes ont été formulées pour des systèmes de distributions automatiques enregistrant des « visites » aux distributeurs.

L'objectif de ce travail était tout d'abord d'utiliser une méthode d'analyse relativement simple du comportement d'ingestion des animaux, basée sur l'étude de la cinétique d'ingestion cumulée au cours du temps. Cette méthode est basée sur une technique originale de segmentation par détection de ruptures, suivie d'une classification des segments obtenus. L'objectif était ensuite d'appliquer cette méthode à l'analyse des modifications de l'ingestion pendant des épisodes d'acidose et lorsque les animaux sont supplémentés en levures.

Matériels et méthodes

Animaux et installations

Douze chèvres laitières (4 Saanen et 8 Alpines) en milieu de lactation ($40 \pm 4,0$ jours de lactation en début d'expérience), pesant $65 \pm 7,4$ kg de poids vif, produisant $3,5 \pm 0,58$ kg au début de l'expérience, canulées du rumen et n'ayant jamais participé à une expérimentation sur l'acidose ont été utilisées. Les chèvres ont été réparties en deux lots selon leur poids vif, leur production laitière de l'année précédente, leur race et leur comportement alimentaire mesuré l'automne précédent, par la proportion de la quantité journalière ingérée 100 min après la distribution (lorsque la variabilité est maximale). Elles ont été placées en cases individuelles de 2 m x 1 m sur caillebotis pendant toute la durée de l'expérience. Ces cases possédaient un abreuvoir pour deux cases, et étaient séparées par des parois pleines jusqu'à environ 1 m du sol, et par des grillages au-dessus de 1 m, afin d'éviter que les chèvres ne se retirent mutuellement les appareils de mesure. L'expérimentation a débuté après deux semaines d'habituation au dispositif expérimental. La nourriture était distribuée individuellement sous forme de ration complète deux fois par jour, après chaque traite, dans des proportions d'un tiers le matin (8 h) et deux tiers l'après midi (16 h), conformément à l'intervalle entre les traites. Les animaux étaient alimentés *ad libitum* et les quantités distribuées étaient adaptées à chaque animal et réajustées chaque semaine afin d'atteindre environ 10 % de refus chaque jour. La composition des régimes est présentée dans le Tableau 1.

Le dispositif expérimental est décrit Figure 1. Les animaux ont tout d'abord reçu un régime à faible pourcentage de concentré (**L**, 20 %) pendant l'habituation aux cases individuelles (**P1**). Ils ont ensuite reçu un régime acidogène riche en concentré (**H**, 50 %) pendant 11 semaines puis à nouveau le régime L pendant trois semaines (**P5**). La période en régime acidogène a été découpée en trois sous-périodes : **P2**, 3 semaines ; **P3** 5 semaines pendant lesquelles uniquement le lot levure (**Y**) a reçu 10 g de levures (*Saccharomyces*

Tableau 1. Composition et analyse du régime expérimental.

	Régime
<i>Composition</i> (% MS) :	
Foin de prairie	35
Pulpe de betterave	15
Concentré ^a	50
Matière sèche (%)	63
Energie nette UFL/kg MS	0.91
PDIN g/kg MS	95
PDIE g/kg MS	103
<i>Analyse</i> (% MS)	
NDF	34.7
ADF	15.9
ADL	1.8
MO	93.6

^a25% blé, 25% orge, 30% maïs, 15% tourteau de soja, 3 % complément minéral et vitaminé et 2 % mélasse.

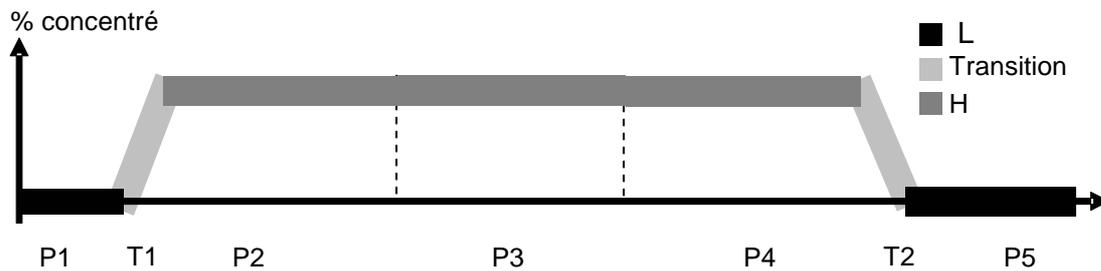


Figure 1. Description du dispositif expérimental et dénomination des différentes périodes suivies par 12 chèvres recevant un régime à fort (50 %, H) ou faible (20 %, L) pourcentage de concentré. P1 a duré 2 semaines, P2, P4 et P5 ont duré 3 semaines, P3 a duré 5 semaines et les transitions (T1 et T2) ont duré 1 semaine.

cerevisiae CBS 493.94, Alltech), via la canule ruminale en 2 apports quotidiens de 5 g avant chaque distribution, le lot Témoin (C) ne recevait rien ; et P4, 3 semaines. Les transitions entre les régimes ont duré une semaine à chaque fois et sont notées T1 et T2. Les animaux disposaient d'une pierre à lécher pendant toute l'expérience.

Ingestion, poids vif et production

Les animaux étaient pesés chaque semaine. Les quantités distribuées et les refus étaient pesés chaque jour avant le repas du soir afin de calculer la matière sèche ingérée quotidienne, ajustée par kg de poids vif (MSIPV), le pourcentage de matière sèche de la ration étant mesuré chaque semaine. La production laitière brute (PLB) était enregistrée cinq jours par semaine. Le pH ruminal était mesuré toutes les minutes par une sonde (Fisher Bioblock Scientific, France) positionnée dans le rumen est reliée à un boîtier enregistreur (EasyLog El-2, Omega engineering. Inc, USA) situé dans une poche de la couverture portée par l'animal, et spécialement conçue pour ce travail. Les couples sonde-boîtier étaient étalonnés (solutions tampon pH 4,01 et 6,87) grâce à un logiciel (El-Win, EasyLog, Lascar Electronics Ltd., USA) chargé sur un ordinateur et reliable au boîtier. Ce logiciel permettait également de télécharger les données stockées tous les deux à trois jours. Le pH moyen quotidien a été calculé lorsque 21 h de mesures étaient, au minimum, disponibles sur la journée.

Détection des crises d'acidose

Les crises d'acidose ont été essentiellement déterminées par les variations journalières d'ingestion et de production laitière. Premièrement, pour chaque chèvre, les jours présentant une MSIPV ou une PLB inférieure à moyenne – 1,5* écart-type (calculés pour chaque chèvre et chaque période) ont été repérés. Deuxièmement, les jours présentant une chute de MSIPV supérieure à 10 g / kg PV ont également été repérés. Troisièmement, les jours présentant un pH moyen ruminal inférieur à 6,0 ont également été repérés. Finalement, une chèvre a été déclarée en crise d'acidose si au moins deux des paramètres parmi le pH, la MSIPV et la production étaient repérés simultanément ou successivement pendant au moins deux jours consécutifs. La fin de la crise était déterminée par la fin des jours repérés. Les jours représentant les crises d'acidose sont codés « 1 », les autres jours sont codés « 0 ».

Cinétiques d'ingestion

Les cinétiques d'ingestion étaient mesurées simultanément sur les 12 chèvres, par 12 balances individuelles (Baléa, France), reliées à un ordinateur enregistrant toutes les deux

minutes le poids des bacs d'alimentation grâce à un logiciel spécialement écrit par Baléa (France). Ces balances n'étaient ni visibles, ni accessibles aux animaux, car situées sous les bacs d'alimentation. Ces données ont permis de calculer pour chaque intervalle de deux minutes la quantité de MSI par kg de poids vif, grâce aux mesures hebdomadaires de la MS de la ration et du poids vif. L'ingestion cumulée par rapport à la distribution d'aliment précédente a ensuite été calculée (MSIPVs et MSIPVm, pour le soir et le matin, respectivement). L'analyse a été réalisée sur les 5 périodes, séparément pour chacune des deux distributions d'aliment.

Méthode d'analyse par segmentation/classification

Segmentation. La Figure 2 présente un exemple de cinétique d'ingestion sur les 15 h suivant la distribution du soir. Durant la période de temps considérée, on peut distinguer différentes périodes durant lesquelles la chèvre n'a pas, peu, moyennement ou beaucoup ingéré d'aliments. Ainsi, une cinétique d'ingestion peut se voir comme une succession de « segments ». Chaque segment représente une période pendant laquelle le comportement d'ingestion ne varie pas, mais ce comportement est différent de celui des périodes précédentes et suivantes. D'un point de vue statistique, les différents segments peuvent se distinguer par des changements dans les pentes de la cinétique. L'objectif de ce travail était de détecter ces changements de manière automatisée, puis de les classer.

La méthode de segmentation utilisée a été celle décrite par Picard et al. (2005) pour l'analyse de données génétiques. Cette méthode, consistant à détecter des changements dans la moyenne, a fait l'objet d'une étude comparative avec d'autres méthodes de segmentation montrant qu'elle faisait partie des plus performantes (Lai et al., 2005). Dans notre analyse, nous supposons que ce sont les pentes de la cinétique qui subissent des changements.

Notons y_1, \dots, y_n , les n données observées de la cinétique. Ces données sont modélisées par n variables aléatoires indépendantes Y_1, \dots, Y_n issues de distributions Gaussiennes et on suppose que la moyenne est linéaire par morceaux (linéaire sur chacun des segments ou périodes de temps). Le modèle s'écrit :

$$Y_t = a_k + b_k x_t + e_t \quad \text{si } t \text{ appartient au segment } I_k = [t_{k-1}+1, t_k],$$

où les t_1, \dots, t_{K-1} sont appelés les instants de ruptures et délimitent les bornes des segments I_k . Les erreurs $\{e_t\}_t$ sont supposées être issues d'une distribution Gaussienne centrée et de variance σ^2 . Les $\{x_t\}_t$ représentent les temps d'observation, et K correspond au nombre de segments.

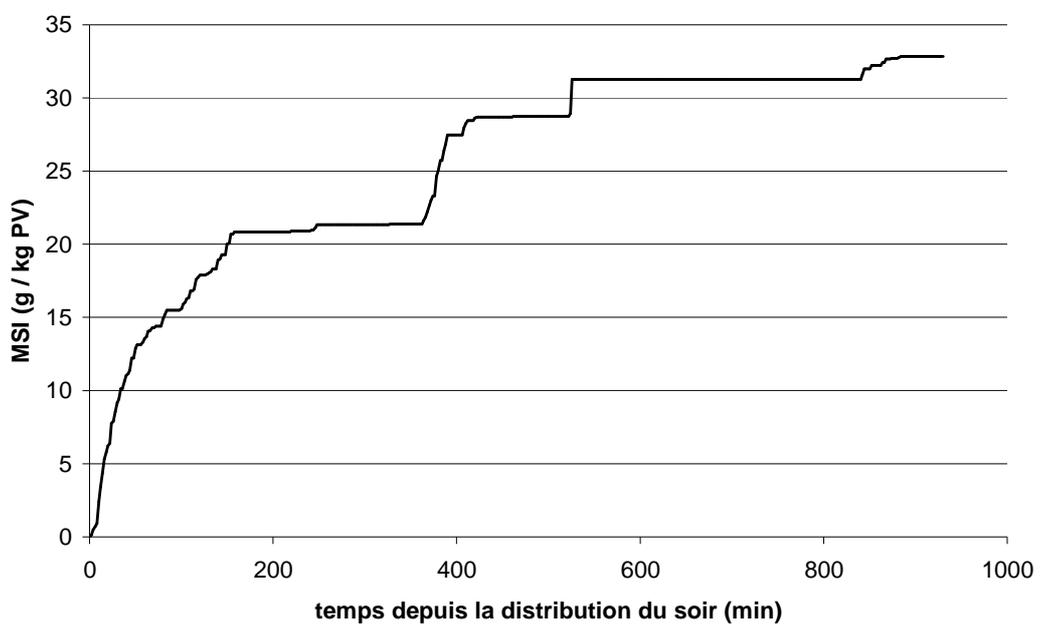


Figure 2. Exemple de cinétique d'ingestion d'une chèvre représentée pendant les 15 heures suivant la distribution du soir.

La meilleure segmentation des données en K segments est obtenue en estimant les instants de ruptures t_1, \dots, t_{K-1} , les pentes b_k , les constantes a_k et la variance σ^2 par la méthode classique du maximum de vraisemblance. Remarquons que, dans ce cas, les estimateurs de b_k et a_k correspondent aux estimateurs classiques des moindres carrés dans un cadre de régression sur chacun des segments (Daudin *et al.*, 2001). Le nombre de segments K est, bien sûr, inconnu en pratique et est choisi à l'aide du critère de vraisemblance pénalisée, tel qu'il a été proposé par Lavielle (2005).

Classification. Une fois les cinétiques segmentées, la question est de savoir si les différentes périodes correspondent à des périodes de non ingestion, d'ingestion lente ou d'ingestion plus ou moins rapide. Pour répondre à cette question, les segments obtenus ont été classés selon la valeur de leur pente en un certain nombre (P) de groupes homogènes fixé. Après plusieurs essais, ce nombre a été fixé à 8, car cette valeur permettait de différencier les différents types d'ingestion, mais aussi de différencier différentes vitesses d'ingestion au sein d'une même période d'ingestion.

D'un point de vue du modèle, cela revient à supposer que si le segment I_k est dans le groupe p , la pente de régression de ce segment est égale à la valeur de la pente de du groupe notée b_p . En revanche, la constante de la droite de régression a_k n'est pas spécifique du groupe, mais dépend aussi du segment k considéré et est donc notée a_{pk} . Cette constante n'a pour rôle que de bien ajuster la droite sur chacun des segments.

Une Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) a été utilisée pour classer les segments en P classes. Cette méthode a pour objectif de construire une suite de partitions emboîtées des données en m classes, $(m-1)$ classes, ..., 1 classe où m est le nombre d'objets (ici les segments) à classer. Pour construire ces partitions, la CAH procède de façon itérative selon le principe suivant : à chaque itération, les segments (ou classes) les plus « proches » sont réunis en une seule classe. Ce processus est réitéré jusqu'à ce qu'il ne reste plus que P classes (on pourra se référer à Saporta (1990) pour une description plus complète de cette méthode). Cette méthode nécessite la définition d'une distance entre segments (et groupes) pour pouvoir déterminer que deux segments sont « proches ». Comme cela a déjà été réalisé par Solomonoff *et al.* (1998), le rapport de la log-vraisemblance a été utilisé comme distance : supposons que l'on dispose de h classes, notées C_1, \dots, C_h , à l'itération suivante, les groupes C et C' sont regroupés si la distance ci-dessous est la plus petite parmi toutes les distances deux à deux possibles.

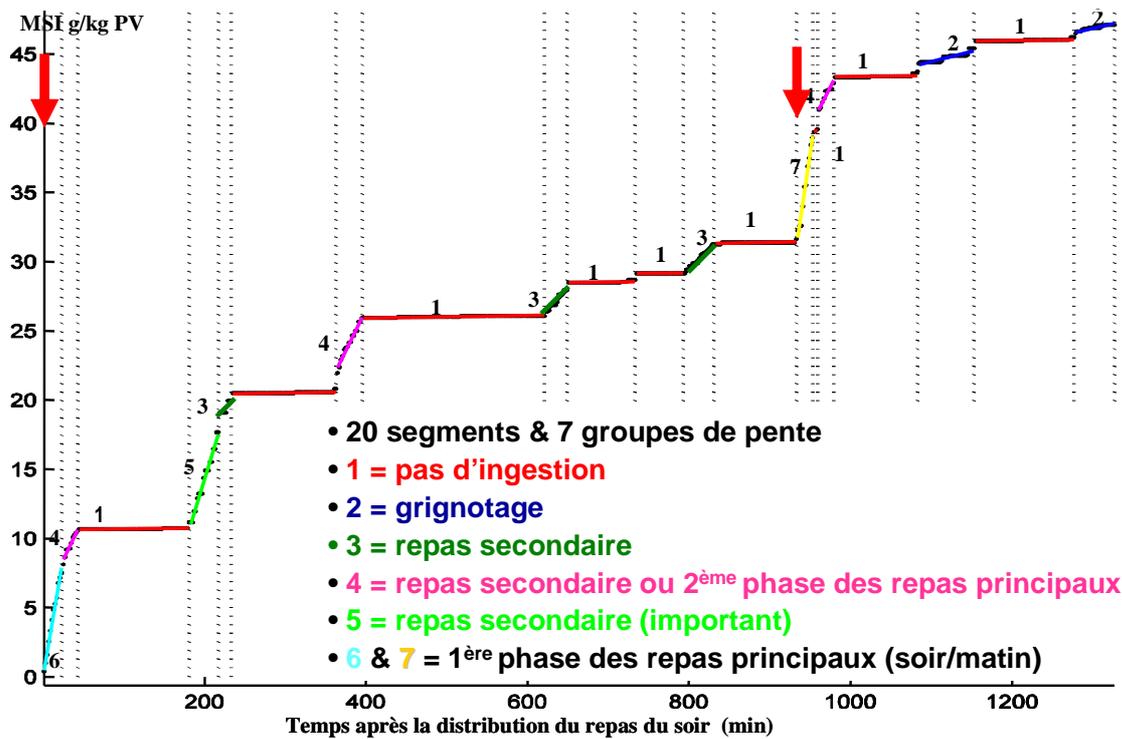


Figure 3. Exemple d'une cinétique d'ingestion d'une chèvre sur un nycthémère, à partir du repas du soir. Les numéros représentent le groupe auquel chaque segment est attribué. La courbe noire représente les points mesurés, les traits pleins colorés représentent les segments déterminés (une couleur par groupe), et les pointillés verticaux représentent la position des ruptures. Les flèches représentent les distributions.

$$d^2(C,C') = \log (L(Y; C_1, \dots, C_h) / L(Y; C_1, \dots, C \cup C', \dots, C_h))$$

$L(Y; C_1, \dots, C_h)$ est la log-vraisemblance des données calculée en son maximum quand les données sont structurées en classes C_1, \dots, C_h , et $L(Y; C_1, \dots, C \cup C', \dots, C_h)$ est la log-vraisemblance des données calculée en son maximum quand les deux classes C et C' ont été fusionnées (on ne dispose donc que de $(h-1)$ classes). Cette distance mesure la perte d'ajustement du modèle aux données lorsque l'on fusionne les groupes C et C' .

La Figure 3 présente un exemple de cinétique d'ingestion sur la journée après segmentation.

Analyse

Une Analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur les cinétiques d'ingestion mesurées après la distribution du soir et lorsque les animaux recevaient le régime H (P2, P3 et P4). Toutes les cinétiques présentant une valeur totale de MSIPVs inférieure à 10 g / kg ont été éliminées. La Figure 4, présente les principaux paramètres utilisés pour l'ACP : MSIPVs totale de la cinétique considérée (**MSIPVs**), nombre de segments (**k**), moyenne des valeurs des pentes des groupes obtenus (**Moy**), latence pour atteindre un premier segment de groupe 1 ou 2 (**lat1ou2**) (car certaines cinétiques ne comprennent pas de segment de groupe 1), différence entre la MSIPVs décrite par les segments (somme pour les segments de 1 à k de (pente du groupe déterminé * durée du segment)) et la MSIPVs réelle de la cinétique (**diffMSI**), et valeur de l'aire à 60, 120 et 180 min sous le (ou les) segment(s) correspondant (**Tr60**, **Tr120** et **Tr180**, respectivement).

Analyse statistique

Seules les données mesurées pendant la deuxième semaine de la période P1 ont été analysées, la première semaine correspondant à l'habituation aux cases individuelles.

Les analyses statistiques ont été réalisées par un modèle linéaire généralisé (Minitab, version 12.2, 1995, Minitab Inc.). L'analyse de l'effet des levures a été réalisée en deux temps. Tout d'abord, un effet rémanent de la supplémentation a été testé entre les périodes P2 et P4 selon le modèle suivant :

$$Y_{ijk} = a_i + b_j(a)_i + T + A + R + (aT)_i + e_{ijk}$$

Où a_i et b_j représentent les effets fixes du lot et de la chèvre hiérarchisée dans le lot. T représente la covariable temps (en jours), A la covariable acidose (0 = jour sans crise et 1 = jour en crise) et R la covariable rémanence (0 = cinétiques pendant P2 et P3 et cinétiques

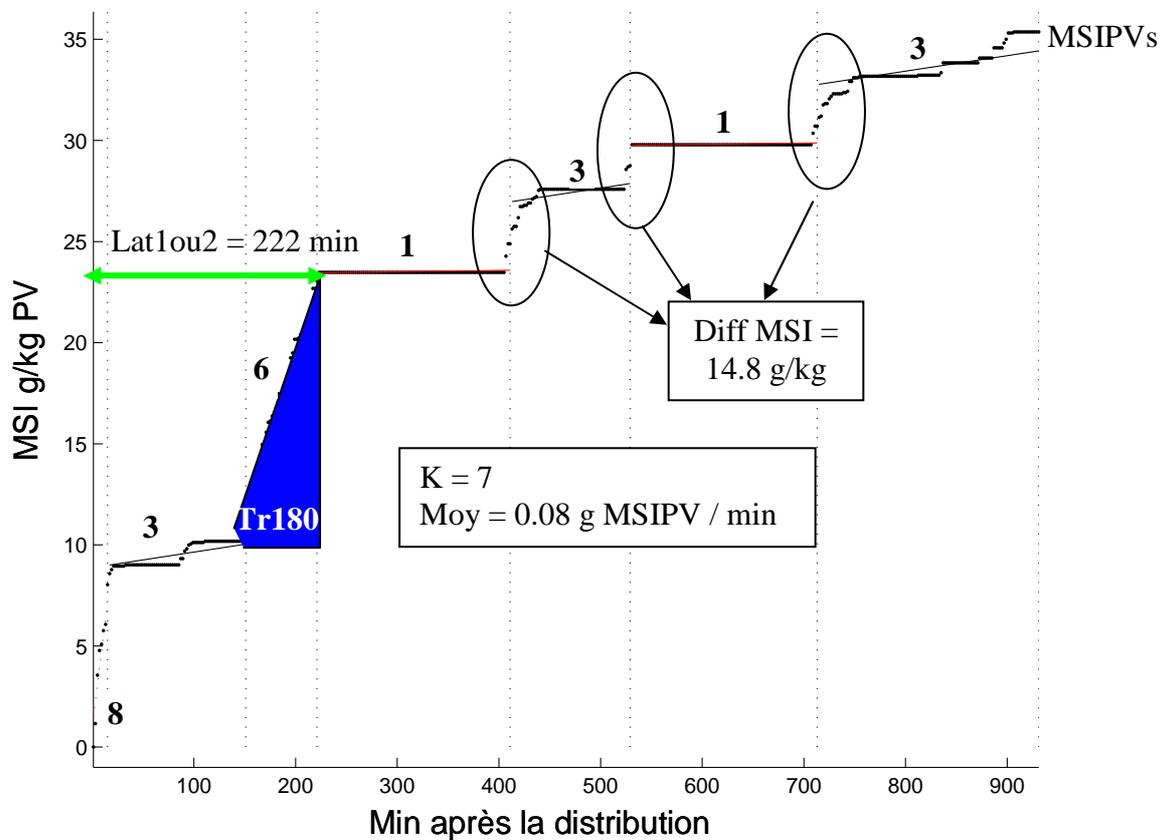


Figure 4. Exemple d'une cinétique d'ingestion après la distribution du soir et de ses paramètres utilisés dans l'ACP. Les numéros représentent le groupe auquel chaque segment est attribué. La courbe noire représente les points mesurés, les traits pleins colorés représentent les segments déterminés, et les pointillés verticaux représentent la position des ruptures. K représente le nombre de segments, Tr180 l'aire sous le segment déterminé à 180 min, Moy la moyenne des pentes des 7 segments, diffMSI la quantité de MSIPV qui n'est pas intégrée dans les segments, lat1ou2 la latence pour atteindre le premier segment de groupe 1 et MSIPVs la quantité totale ingérée pendant la cinétique.

pendant P4 pour les animaux du groupe C et 1 = cinétiques pendant P4 pour animaux du groupe Y). aT représente l'interaction entre le lot et le temps et E_{ijk} , l'erreur résiduelle.

Si cet effet rémanent n'était pas significatif, l'influence des levures était testée sur les périodes P2, P3 et P4 par le modèle suivant :

$$Y_{ijk} = a_i + b_j(a)_i + T + A + Y + (aT)_i + e_{ijk}$$

Où a_i et b_j représentent les effets fixes du lot et de la chèvre hiérarchisée dans le lot. T représente la covariable temps (en jours), A la covariable acidose (0 = jour sans crise et 1 = jour en crise) et Y la covariable levure (0 = cinétiques pendant P2 et P4 et groupe C pendant P3 et 1 = groupe Y pendant P3). aT représente l'interaction entre le lot et le temps et E_{ijk} l'erreur résiduelle. Si un effet rémanent était détecté, l'effet des levures était testé de la même manière mais uniquement entre les périodes P2 et P3.

Résultats et discussion

Description des groupes obtenus

Le Tableau 2 présente les valeurs des pentes pour chaque groupe de segments, ainsi que la valeur de la pente minimale et maximale chacun des groupes, pour les analyses réalisées sur les distributions du matin et du soir. Pour plus de clarté, les valeurs de pentes, initialement mesurées en gramme de MSIPV par minute ont été recalculées pour une chèvre « moyenne » pesant 65 kg. Le groupe 1 correspond à des périodes pendant lesquelles les animaux n'ingèrent pas. Le groupe 2 correspond à du grignotage. Sur la Figure 3, deux des trois segments du groupe 3 peuvent être assimilés à des repas secondaires mais ils peuvent également correspondre à des périodes assez longues de grignotage, ou à plusieurs repas regroupés dans un même segment. Les segments du groupe 4 peuvent être assimilés à des repas secondaires plus importants que ceux du groupe 3, mais peuvent également correspondre à la seconde phase des repas principaux (Figure 3) lorsque ceux-ci comprennent plusieurs segments. Les groupes 5 et 6 peuvent être assimilés à des repas secondaires importants, à des repas principaux, ou correspondre à la première phase de repas principaux ou secondaires (Figure 3). Les groupes 7 et 8 correspondent généralement à la première partie des repas principaux (Figure 3), mais peuvent aussi représenter la première partie de repas secondaires importants.

La Figure 5 présente la valeur de la pente obtenue pour chaque groupe (a) et la proportion de segments obtenus dans chaque groupe (b) pour chaque distribution et pour les cinq périodes expérimentales. La Figure 5 a montre que les groupes de pentes ne se chevauchent

Tableau 2. Valeurs de la pente (g MSIPV / min (g MSI / min pour une chèvre « moyenne » de 65 kg)) déterminée pour chaque groupe de segments et valeurs minimales (min) et maximales des pentes (g MSIPV / min (g MSI / min pour une chèvre « moyenne » de 65 kg)) dans chacun des 8 groupes de segments déterminés pour la distribution du matin ou du soir par la méthode de segmentation / classification.

Groupe	Matin						Soir					
	Pente		min		max		Pente		min		max	
1	0,001	(0,1)	0,000	(0,0)	0,002	(0,1)	0,001	(0,0)	0,000	(0,0)	0,002	(0,1)
2	0,004	(0,3)	0,002	(0,1)	0,009	(0,6)	0,003	(0,2)	0,002	(0,1)	0,005	(0,3)
3	0,012	(0,8)	0,009	(0,6)	0,019	(1,2)	0,008	(0,5)	0,005	(0,3)	0,024	(1,6)
4	0,026	(1,7)	0,019	(1,2)	0,042	(2,7)	0,043	(2,8)	0,024	(1,6)	0,063	(4,1)
5	0,067	(4,4)	0,042	(2,8)	0,100	(6,5)	0,091	(5,9)	0,063	(4,1)	0,120	(7,8)
6	0,133	(8,6)	0,100	(6,5)	0,185	(12,0)	0,145	(9,4)	0,121	(7,8)	0,197	(12,8)
7	0,237	(15,4)	0,186	(12,1)	0,305	(19,8)	0,244	(15,9)	0,198	(12,9)	0,316	(20,6)
8	0,391	(25,4)	0,306	(19,9)	2,355	(153,1)	0,406	(26,4)	0,318	(20,6)	2,120	(137,8)

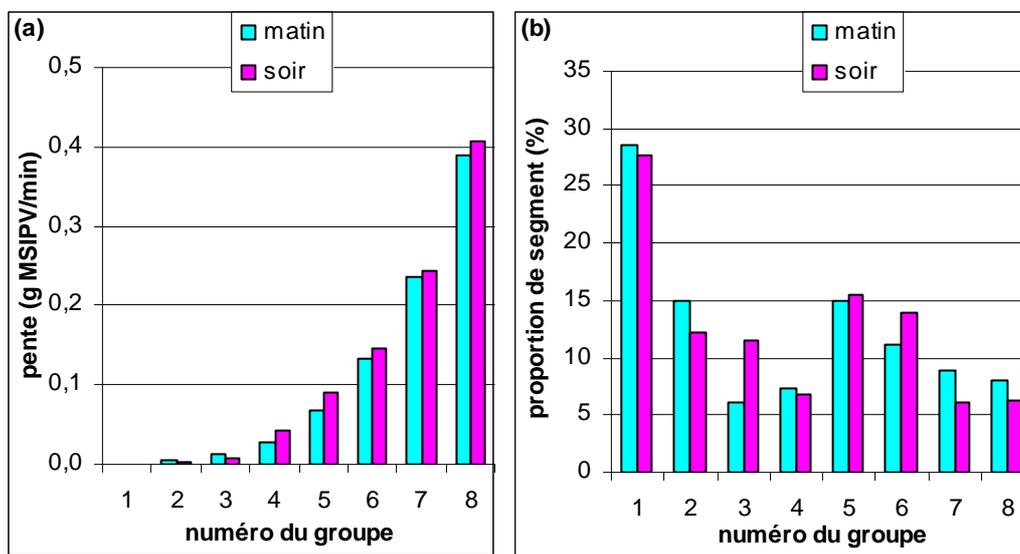


Figure 5. Valeur de la pente (a) et proportion de segments (b) dans chacun des 8 groupes déterminés par la méthode de segmentation / classification et pour chaque distribution d'aliment (matin ou soir).

pas, et que les valeurs de pentes obtenues pour les distributions du soir et du matin sont similaires. La Figure 5 b montre que la proportion de segments dans chaque groupe est relativement similaire entre les deux distributions. Plus de 25 % du nombre total de segments est représenté par les segments du groupe 1, c'est-à-dire sans ingestion. Les groupes 5 et 6 sont ensuite les plus représentés. Ces groupes peuvent représenter des repas secondaires relativement importants, ainsi que des repas principaux, ce qui peut expliquer leur plus forte proportion. La distribution du matin comprend proportionnellement plus de segments de type « ingestion rapide » (groupes 7 et 8) que la distribution du soir. La distribution du soir comprend, en revanche, proportionnellement plus de segments du groupe 3, correspondant à de petits repas secondaires. Ceci peut être dû au fait que la période analysée après la distribution du soir est plus longue que celle analysée après la distribution du matin, et comprend la nuit. Les petits repas secondaires sont en effet majoritairement observés loin des repas principaux et pendant la nuit.

ACP sur la distribution du soir

Axe1. L'ACP sur la distribution du soir a été réalisée avec 554 cinétiques. La Figure 6 présente la projection des variables dans le plan 1-2 de cette ACP. Les deux premiers axes représentent respectivement 34 et 17 % de la variabilité totale. L'axe 1 oppose principalement les cinétiques comprenant beaucoup de segments (k élevé) aux cinétiques qui comprennent peu de segments et dont la latence pour atteindre un segment de type 1 ou 2 est importante. Ces cinétiques présentant peu de segments ont également une aire sous les segments observés à 60 et 120 min importante, ainsi qu'une moyenne des pentes importante. La Figure 7 présente trois exemples de cinétiques extrêmes observées à l'extrémité positive ou négative de l'axe 1. Les signes des coefficients sur les axes de l'ACP n'ont aucune signification biologique, et peuvent être inversés entre deux ACP. Cette notation a essentiellement été utilisée pour une raison de clarté. Cette figure confirme l'opposition décrites sur l'axe 1. En effet, la cinétique exemple du groupe 1⁻ présente 17 segments et une latence de 38 min pour atteindre un segment de groupe 1 ou 2, tandis que les cinétiques exemples du groupe 1⁺ présentent respectivement 4 et 8 segments, mais une latence de plus de 120 min pour atteindre un segment de groupe 1 ou 2. Ces exemples illustrent aussi le fait que les cinétiques du groupe 1⁺ présentent des aires sous les segments observés à 60 et 120 minutes plus importantes que celles du groupe 1⁻. Ceci est d'ailleurs tout à fait cohérent avec la latence de plus de 120 min observée pour atteindre le premier segment à très faible ingestion. L'axe 1 permet donc de différencier d'une part des animaux qui ont un comportement d'ingestion très

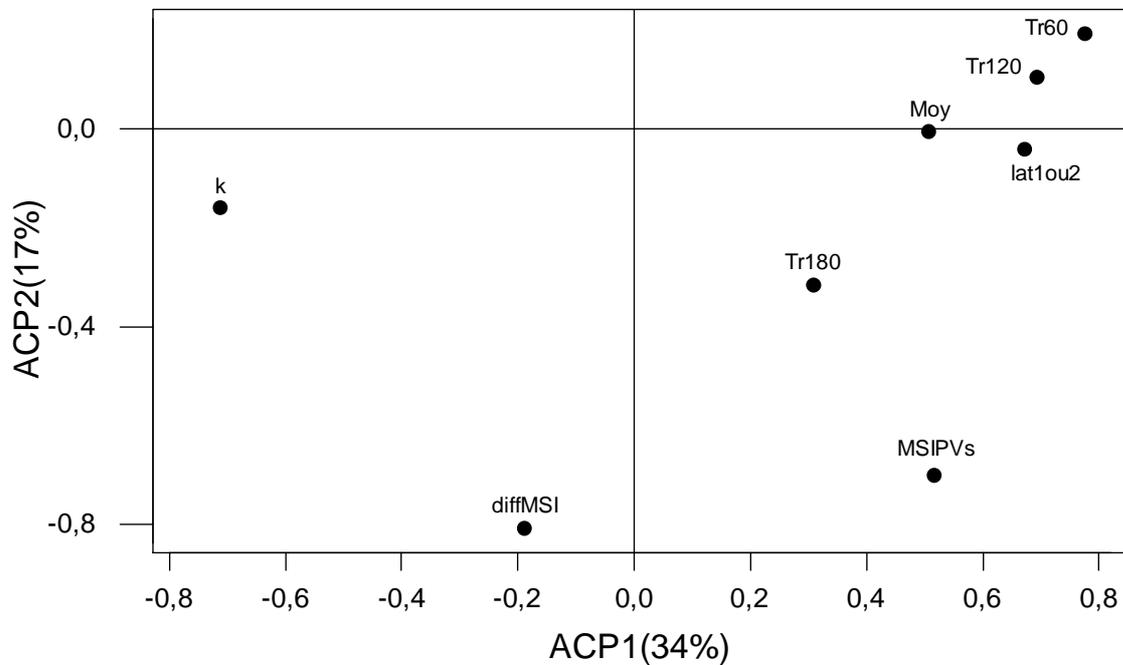


Figure 6. Projection des variables dans le plan 1-2 de l'ACP réalisée pour les cinétiques d'ingestion mesurées entre la distribution du soir et celle du matin. k représente le nombre de segments, Tr60 Tr120 et Tr180 les aires sous les segment déterminés à 60, 120 et 180 min respectivement, Moy la moyenne des pentes des k segments, diffMSI la quantité de MSIPV qui n'est pas intégrée dans les segments, lat1ou2 la latence pour atteindre le premier segment de groupe 1 et MSIPVs la quantité totale ingérée pendant la cinétique.

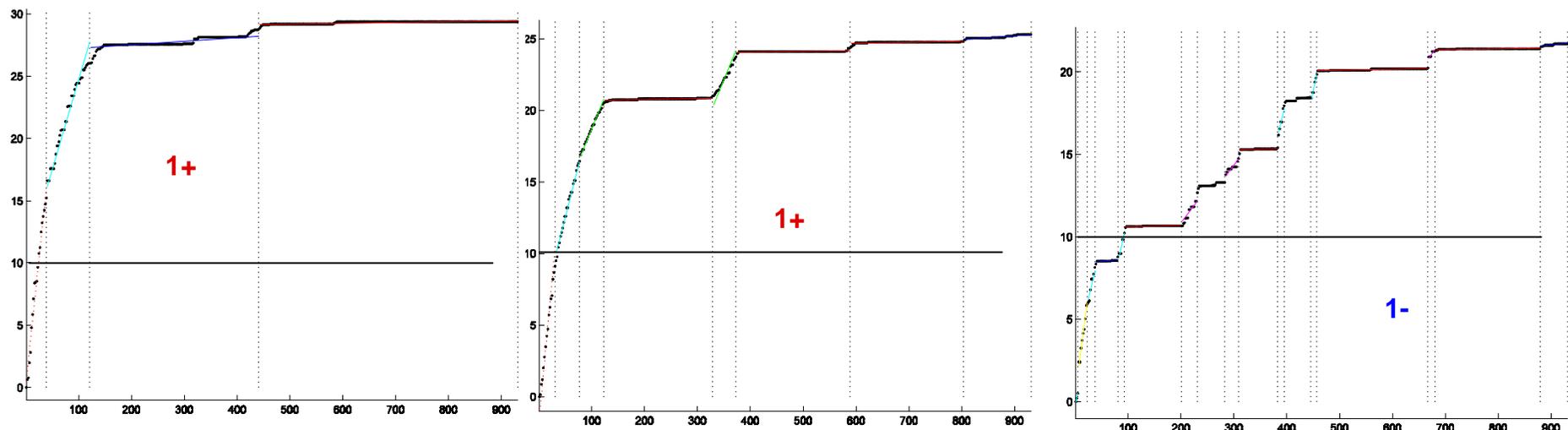


Figure 7. Exemples de cinétiques d'ingestion présentant des projections extrêmes sur l'axe 1 de l'ACP réalisée pour les cinétiques d'ingestion mesurées entre la distribution du soir et celle du matin. Les groupes 1^+ et 1^- représentent respectivement les cinétiques extrêmes dans la partie positive et négative de l'axe 1 de l'ACP. La courbe noire représente les points mesurés, les traits pleins colorés représentent les segments déterminés, et les pointillés verticaux représentent la position des ruptures. Les traits horizontaux représentent 10 g de MSIPVs. L'abscisse représente le temps en minutes entre la distribution du soir et celle du matin.

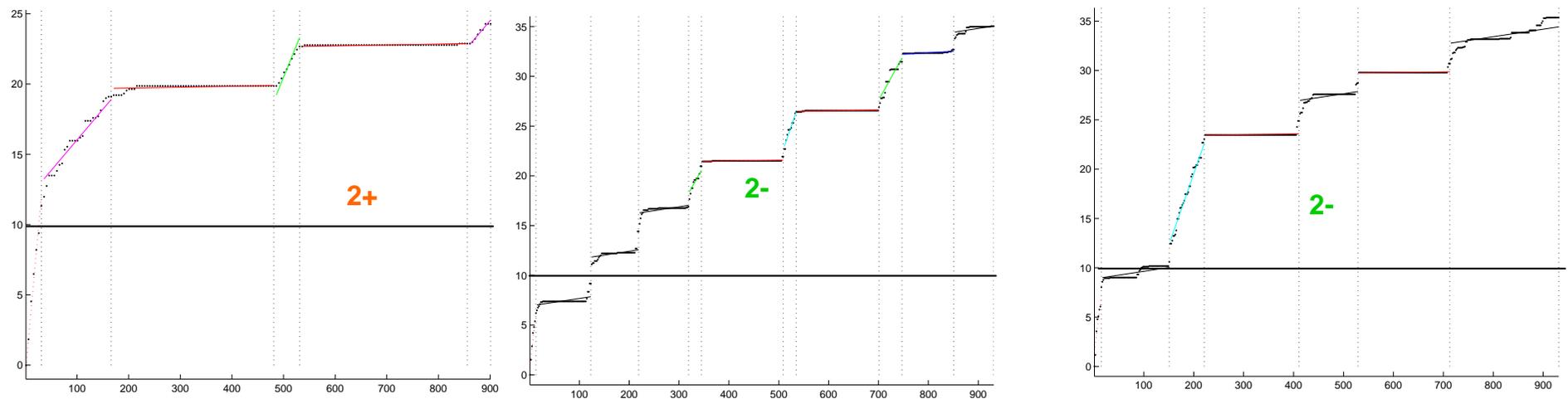


Figure 8. Exemples de cinétiques d'ingestion présentant des projections extrêmes sur l'axe 2 de l'ACP réalisée pour les cinétiques d'ingestion mesurées entre la distribution du soir et celle du matin. Les groupes 2^+ et 2^- représentent respectivement les cinétiques extrêmes dans la partie positive et négative de l'axe 2. La courbe noire représente les points mesurés, les traits pleins colorés représentent les segments déterminés, et les pointillés verticaux représentent la position des ruptures. Les traits horizontaux représentent 10 g de MSIPVs. L'abscisse représente le temps en minutes entre la distribution du soir et celle du matin.

fractionné (k important) et qui n'ingèrent pas (ou peu) pendant une ou deux heures après la distribution, de ceux qui réalisent peu de repas, mais présentent de très longues périodes d'ingestion (> 2 h) suite à la distribution. Dans ces 2 cas exemples proposés pour le groupe 1⁺, la première période d'ingestion, comprenant plusieurs segments, semble pouvoir être assimilée à un long repas principal.

Axe2. L'axe 2 (Figure 6) est principalement déterminé par un problème d'ajustement de la quantité de MSIPVs car une partie de la MSIPVs n'a pas été prise en compte dans les segments. Il est cependant également déterminé par la MSIPVs totale et par l'aire sous le segment observé 60 min après la distribution. La Figure 8 présente trois exemples de cinétiques extrêmes observées à l'extrémité positive ou négative de l'axe 2. Cette figure confirme que l'axe 2 oppose principalement des cinétiques à forte MSIPVs (partie négative), mais qui présentent des aires faibles sous les segments observés à 60 et 120 min, à des cinétiques de plus faible MSIPVs, mais présentant des longues périodes d'ingestion jusqu'à 120 min au minimum. Les cinétiques du groupe 2⁻ sont également moins bien ajustées par cette méthode, car certains repas très rapides sont considérés comme des ruptures et non comme des segments. Les cinétiques du groupe 2⁻ présentent donc une ingestion plus importante mais plus fragmentée que celles du groupe 2⁺ qui présentent une ingestion plus faible mais moins de repas. Selon cette description, les groupes 1⁺ et 2⁺ semblent, cependant, assez similaires, ce qui est cohérent avec la position des variables dans le plan 1-2 (Figure 6), montrant que les aires sous les segments observés à 60 et 120 min sont corrélées à la partie positive de l'axe 1, mais correspondent également aux principaux facteurs corrélés à la partie positive de l'axe 2. Cet axe 2 étant principalement déterminé par le problème d'ajustement, il ne permet pas vraiment de différencier des types de comportement d'ingestion différents.

La Figure 9 présente la projection des 554 cinétiques utilisées dans ce même plan 1-2 de l'ACP. Cette figure montre que la majorité des cinétiques d'une même chèvre sont relativement groupées dans une partie de ce plan, même si quelques points sont toujours excentrés. Ceci est cohérent avec les observations du chapitre 3.2 sur la typologie du comportement alimentaire qui montre que certaines chèvres ont eu un comportement très stable tout au long de l'expérience, tandis que d'autres ont évolué au cours du temps. L'analyse individuelle ne sera donc pas effectuée à nouveau sur cette ACP.

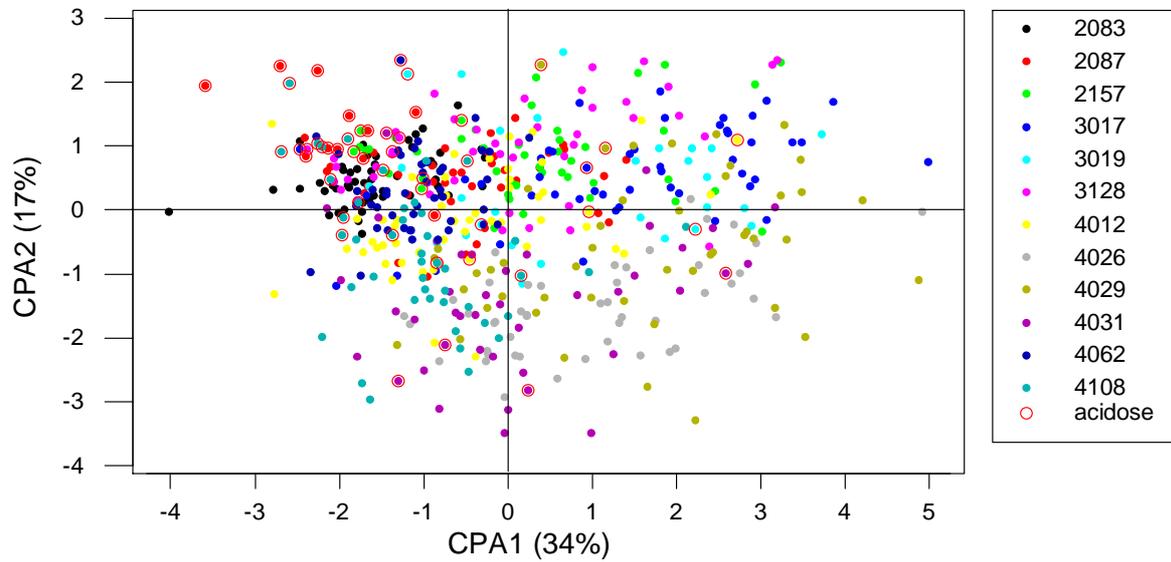


Figure 9. Projection dans le plan 1-2 de l'ACP des cinétiques d'ingestion mesurées entre la distribution du soir et celle du matin. Chaque couleur représente une chèvre, les jours considérés en crise d'acidose sont entourés en rouge.

Segmentation et repas

Les segments obtenus avec cette méthode ne peuvent pas être systématiquement assimilés à des repas ou à des intervalles inter-repas. En effet, d'une part, l'exemple de la Figure 3 illustre que les repas principaux peuvent être divisés en deux segments : un premier segment caractérisé par une ingestion très rapide, suivi d'un deuxième segment caractérisé par une ingestion plus lente. Ceci est cohérent avec les résultats de Dukworth et Shirlaw (1958, cités par Jarrige *et al.*, 1995) montrant que la vitesse d'ingestion diminue au cours des repas principaux. Abijaoudé *et al.* (2000a) ont d'ailleurs également observé, sur des régimes riches en concentré, une diminution de la vitesse d'ingestion au cours des repas principaux, et plus particulièrement entre 10 et 30 min après la distribution. Ceci confirme également que la cinétique d'ingestion cumulée peut être décrite en fonction du temps (t) écoulé depuis le début du repas par un modèle exponentiel $MSI = K(1 - \exp^{-bt})$, dans lequel b représente une constante de rassasiement (Jarrige *et al.*, 1995), même si cela n'est pas vérifié pour tous les repas. Dans la présente étude, ce type d'équation n'est en effet vérifié que pour la plupart des repas principaux et certains repas secondaires important, mais n'est pas applicable à tous les repas. Ceci est dû au fait que la vitesse d'ingestion est liée aux sensations de faim et de satiété. Elle est donc élevée juste après la distribution, puis diminue progressivement au fur et à mesure que la sensation de satiété augmente suite à l'augmentation de la pression osmotique (Rémond *et al.*, 1995), de la concentration d'acide lactique (Buéno, 1975), de propionate (Allen, 2000), ou d'acides gras volatils (Forbes, 2007). La diminution de la vitesse d'ingestion en fin de repas est également due à une diminution de la fréquence de déglutition des bols alimentaires qui sont mastiqués de plus en plus longuement, et à l'apparition de plus en plus fréquente de brèves interruptions de l'activité masticatoire (Jarrige *et al.*, 1995).

D'autre part, l'exemple de la Figure 4 illustre le fait que certaines phases d'ingestion très courtes avec des vitesses élevées ne sont pas considérées comme des segments par notre méthode mais comme des ruptures, alors qu'elles semblent pouvoir être assimilées à des repas secondaires. Enfin, la cinétique exemple du groupe 2⁺ de la Figure 8 illustre, par son deuxième segment comprenant des petits paliers, que des périodes sans ingestion peuvent être intégrées dans un segment d'un groupe supérieur à 2, représentant de l'ingestion, et qu'un segment n'est donc pas toujours assimilable à un repas au sens strict du terme.

Cette nouvelle méthode d'analyse ne permet donc pas d'analyser les cinétiques d'ingestion en terme de repas (Heinrichs et Conrad, 1987 ; Masson *et al.*, 1989 ; Abijaoudé *et al.*, 2000a) mais d'une manière plus globale, basée sur les vitesses d'ingestion.

Tableau 3. Effet rémanent de la supplémentation en levures (coefficient estimé), de la supplémentation en levures (contrôle (C) vs. Levures (Y)) et des crises d'acidose (coefficient estimé) sur les coefficients des cinétiques sur les axes 1 et 2 de l'ACP réalisée pour les cinétiques d'ingestion mesurées entre la distribution du soir et celle du matin.

	n ^a	Rémanence		Levure			acidose		rmse
		coef	<i>P</i>	C	Y	<i>P</i>	Coef	<i>P</i>	
axe1	550 (275)	0.20	NS	0.77	1.14	*	- 0.88	***	1.14
axe2	337 (275)	-0.71	**	0.26	-0.19	†	+ 0.60	**	0.78

^a nombre d'observations pour l'analyse de l'effet des levures et de l'acidose (pour l'analyse de la rémanence)

Effets des levures et de l'acidose

Le Tableau 3 présente les effets de la supplémentation en levures et des crises d'acidose sur les coefficients des cinétiques sur les axes 1 et 2 de l'ACP. Même si les cinétiques présentant des quantités totales ingérées inférieures à 10 g MSI / kg de poids vif ont été retirées de l'analyse, les cinétiques mesurées pendant les crises d'acidose se distinguent des autres cinétiques et sont plus représentées dans la partie négative de l'axe 1 ($P < 0,001$) et positive de l'axe 2 ($P = 0,004$) (Figure 9). La Figure 10 présente deux exemples de cinétiques observées pendant des crises d'acidose. Ces cinétiques sont caractérisées par un nombre important de segments, de nombreuses périodes d'ingestion et une MSIPVs relativement faible. Ceci est cohérent avec notre définition des crises d'acidose basée sur des mesures journalières, et confirme que les cinétiques d'ingestion des animaux en crise d'acidose sont caractérisées par une chute d'appétit et une déstructuration de l'organisation de l'ingestion. En effet, le repas principal est très nettement réduit par rapport à celui des animaux qui ne sont pas en crise d'acidose.

La supplémentation des animaux en levures a entraîné une augmentation de la valeur du coefficient déterminé sur l'axe 1 ($P = 0,02$), et a eu tendance à augmenter la valeur du coefficient sur l'axe 2 ($P = 0,08$). Les animaux supplémentés ont donc présenté des cinétiques avec moins de segments, des valeurs moyennes de pentes plus importantes, des temps de latence plus importants avant d'arrêter d'ingérer et des aires sous les segments atteints à 60 ou 120 min supérieures. Globalement, ils ont donc présenté une période d'ingestion plus importante et plus longue suite à la distribution de nourriture que les animaux non supplémentés. Ceci est cohérent avec les résultats obtenus au chapitre 5.1 montrant une durée des repas principaux plus longue pour les animaux supplémentés. Ceci pourrait être dû à une stabilisation des fermentations ruminales ou à une diminution de la chute de pH ruminal postprandial grâce à l'apport de levures, entraînant une sensation de satiété plus tardive et une ingestion supérieure pendant cette première période d'ingestion, même si ces hypothèses n'ont pas été confirmées par l'analyse de l'influence des levures sur les fermentations ruminales (Chapitre 4.2). Cela pourrait également être dû au tri plus important effectué par les animaux supplémentés par rapport aux animaux non supplémentés (Chapitre 5.1).

Validation de la méthode

La Figure 11 présente la projection des points « animaux-jour » (représentant simultanément les cinétiques d'ingestion et de rumination entre la distribution du soir et celle du matin) extrêmes sur les axes 1 et 2 de l'ACP-A présentée au chapitre 3.2., et qui ont permis

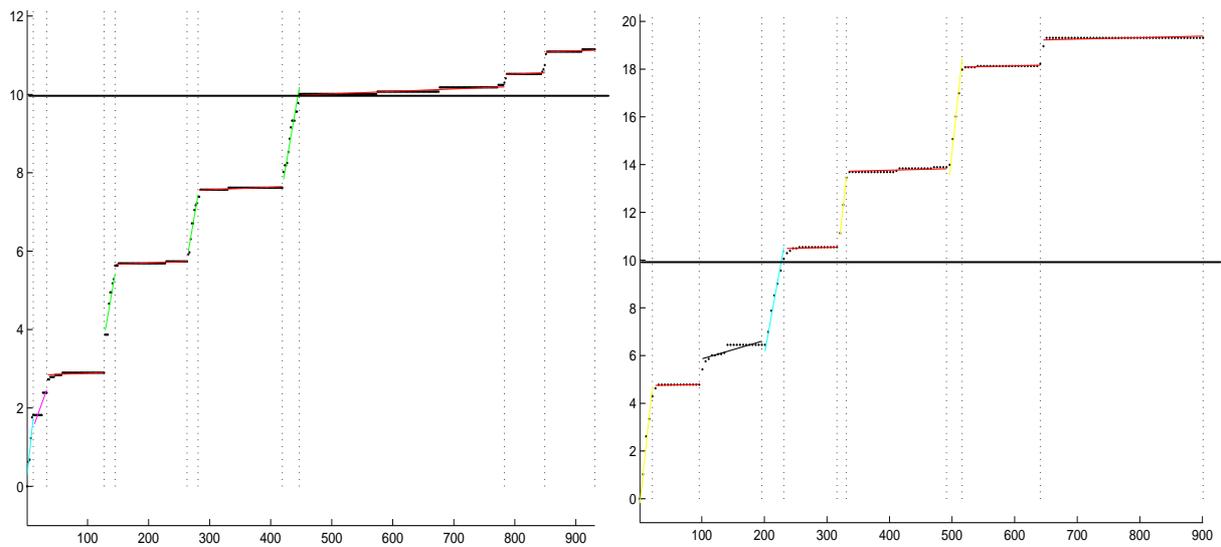


Figure 10. Exemples de cinétiques observées pendant des crises d'acidose. La courbe noire représente les points mesurés, les traits pleins colorés représentent les segments déterminés, et les pointillés verticaux représentent la position des ruptures. Les traits horizontaux représentent 10 g de MSIPVs. L'abscisse représente le temps en minutes entre la distribution du soir et celle du matin.

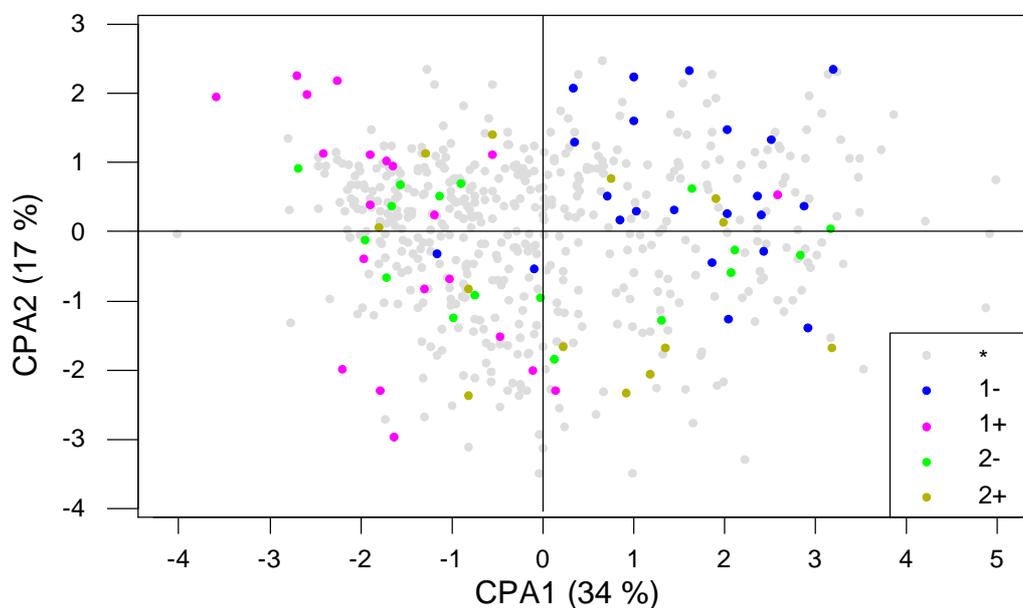


Figure 11. Projection des cinétiques correspondant aux individus extrêmes sur les axes 1 (1^+ et 1^-) et 2 (2^+ et 2^-) de l'ACP-A du chapitre 3.2. réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination dans le plan 1-2 de l'ACP de la présente analyse réalisée pour les cinétiques d'ingestion mesurées entre la distribution du soir et celle du matin.

de mettre en évidence des comportements alimentaires types pour les chèvres de cette même expérience. L'opposition entre les groupes « 1⁻ » et « 1⁺ » de cette ACP-A est retrouvée sur l'axe 1 de la présente ACP, même si le signe des groupes est opposé. Comme cela a déjà été précisé, la valeur des signes n'a pas de signification propre, et les axes pourraient être inversés sans aucune influence sur les résultats. En revanche, l'opposition entre les groupes extrêmes déterminés sur l'axe 2 de cette ACP-A n'est pas retrouvée sur la présente ACP. Ceci peut être dû au fait que l'axe 2 de la présente ACP est principalement déterminé par les quantités ingérées, et par l'ajustement de notre méthode. La principale opposition obtenue sur l'axe 1 des deux ACP, réalisées sur des paramètres différents, est donc cohérente entre les deux méthodes. Sur l'axe 1, ceci confirme que les cinétiques du groupe 1⁺ de la présente ACP correspondent à des animaux qui réalisent un grand repas, puis ruminent, tandis que celles du groupe 1⁻ correspondent à des animaux qui alternent ingestion et rumination.

Ceci montre que cette méthode d'analyse des cinétiques d'ingestion par segmentation/classification permet de distinguer les deux types principaux de comportement alimentaire.

Conclusion

Cette méthode d'analyse des cinétiques d'ingestion par segmentation / classification présente une nouvelle approche de l'analyse du comportement alimentaire par une méthode relativement simple et globale qui ne nécessite pas la détermination des repas au sens strict du terme. Les résultats obtenus avec cette méthode sont cohérents avec ceux obtenus avec des méthodes plus classiques analysant les paramètres des repas, mais également avec ceux obtenus par des méthodes plus globales utilisant davantage de paramètres, et intégrant plus particulièrement les phases de rumination. Ceci montre que cette méthode peut être utilisée pour analyser le comportement alimentaire d'animaux en cases individuelles munies d'auges sur balances permettant l'enregistrement automatique des données.

Une modification de cette méthode est cependant en cours de réalisation, en particulier pour résoudre le problème de la non prise en compte des quantités ingérées pendant les "ruptures". Cela permettra d'améliorer l'ajustement de la méthode et donc d'augmenter la fiabilité des résultats.

Cette méthode utilisant uniquement des données issues de pesées régulières des bacs d'alimentation est complémentaire, mais plus simple à mettre en œuvre d'un point de vue expérimental, que celle utilisant les durées d'ingestion et de rumination issues de mesures par des appareils portatifs de type APEC (Brun *et al.*, 1984). Il s'agit d'une approche originale du

comportement d'ingestion qui pourrait donc être utilisée pour caractériser le comportement alimentaire des animaux (ruminants ou même monogastriques) afin de mieux comprendre les adaptations des animaux à leur régime ou aux épisodes de perturbations digestives, telles que l'acidose, dans le cas des ruminants.

Remerciements

Les auteurs remercient Alltech Inc. (Lexington, KY) pour leur support financier à ce projet. Ils remercient également A. Aymard, G. Chevallier, O. Dhumez, G. Durandet, M. Langot, P. Piquerel, A. Severin, and J. Tessier pour leur aide pendant l'expérience.

Références

- Abijaoudé, J. A. 1999. Influence de la nature du régime sur le comportement alimentaire, la digestion, le métabolisme et les performances des chèvres laitières. Thèse de doctorat: Institut national agronomique Paris-Grignon. 138 p
- Abijaoudé, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P. et Sauvant, D. 2000a. Diet effect on the daily feeding behaviour, frequency and characteristics of meals in dairy goats. *Livest. Prod. Sci.* 64: 29-37.
- Abijaoudé, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P. et Sauvant, D. 2000b. Contribution of main and secondary meals to the daily intake of stall-housed dairy goats in mid lactation. *Options mediterr., Ser. A* 52: 33-37.
- Allcroft, D. J., Tolkamp, B. J., Glasbey, C. A. et Kyriazakis, I. 2004. The importance of 'memory' in statistical models for animal feeding behaviour. *Behav. Processes* 67: 99-109.
- Allen, M. S. 2000. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 83: 1598-1624.
- Bach, A., Iglesias, C. et Devant, M. 2007. Daily rumen pH pattern of loose-housed dairy cattle as affected by feeding pattern and live yeast supplementation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 136: 146-153.
- Brun, J. P., Prache, S. et Béchet, G. 1984. A portable device for eating behaviour studies. 5th european grazing workshop, Edimbourg, UK. 1-8.
- Buéno, L. 1975. Role de l'acide DL-lactique dans le contrôle de l'ingestion alimentaire chez le mouton. *Ann. Rech. Vet.* 6: 325-335.
- Daudin, J., Robin, S. et Vuillet, C. 2001. Statistique inférentielle. Idées, démarches, exemples, Société Française de Statistique.
- Deswysen, A. G., Dutilleul, P., Godfrin, J. P. et Ellis, W. C. 1993. Nycterohemeral eating and ruminating patterns in heifers fed grass or corn-silage - Analysis by finite Fourier-transform. *J. Anim. Sci.* 71: 2739-2747.

- DeVries, T. J., von Keyserlingk, M. A. G., Weary, D. M. et Beauchemin, K. A. 2003. Measuring the feeding behavior of lactating dairy cows in early to peak lactation. *J. Dairy Sci.* 86: 3354-3361.
- Forbes, J. M. 2007. A personal view of how ruminant animals control their intake and choice of food: minimal total discomfort. *Nutr. Res. Rev.* 20: 132-146.
- Friggens, N. C., Nielsen, B. L., Kyriazakis, I., Tolkamp, B. J. et Emmans, G. C. 1998. Effects of feed composition and stage of lactation on the short-term feeding behavior of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81: 3268-3277.
- Heinrichs, A. J. et Conrad, H. R. 1987. Measuring feed intake patterns and meal size of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 70: 705-711.
- Jarrige, R., Dulphy, J. P., Faverdin, P., Baumont, R. et Demarquilly, C. 1995. Activités d'ingestion et de rumination. *Nutrition des ruminants domestiques*. Ed. R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.-H. Farce et M. Journet, INRA: 123-181.
- Lai, W., Johnson, M., Kucherlapati, R. et Park, P. J. 2005. Comparative analysis of algorithms for identifying amplifications and deletions in array CGH data. *Bioinformatics* 21: 3763-3770.
- Lavielle, M. 2005. Using penalized contrasts for the change-points problem. *Signal Processing* 85: 1501-1510.
- Masson, C., Kirilov, D., Faurie, F. et Tisserand, J. L. 1989. Comparaison des activités alimentaires et méryciques d'ovins et de caprins recevant de la paille d'orge traitée ou non à la soude. *Ann. Zootech.* 38: 73-82.
- Picard, F., Robin, S., Lavielle, M., Vaisse, C. et Daudin, J. 2005. A statistical approach for array cgh data analysis. *BMC Bioinformatics* 6: 1-14.
- Rémond, B., Brugère, H., Poncet, C. et Baumont, R. 1995. Le contenu du réticulo-rumen. *Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion*. Ed. Y. R. R Jarrige, C Demarquilly, MH Farce and M Journet, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris, France.: 253-298.
- Saporta, G. 1990. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Paris, Editions Technip.
- Solomonoff, A., Mielke, A., Schmidt, M. et Gish, H. 1998. Clustering speakers by their voice. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP apos.* 2: 757-760.
- Tolkamp, B. J. et Kyriazakis, I. 1999. A comparison of five methods that estimate meal criteria for cattle. *Anim. Sci.* 69: 501-514.
- Tolkamp, B. J., Friggens, N. C., Emmans, G. C., Kyriazakis, I. et Oldham, J. D. 2002. Meal patterns of dairy cows consuming mixed foods with a high or a low ratio of concentrate to grass silage. *Anim. Sci.* 74: 369-382.
- Yeates, M. P., Tolcamp, B. J. et Kyriazakis, I. 2002. The relationship between meal composition and long-term diet choice. *J. Anim. Sci.* 80: 3165-3178.

CHAPITRE 6

**Survie des levures dans l'organisme
et influence des levures
sur l'écosystème microbien ruminal**

**CHAPITRE 6 : Survie des levures dans l'organisme et influence
des levures sur l'écosystème microbien ruminal**

**1. Cinétiques d'apparition, survie et disparition de Yea-Sacc^{®1026}
(*Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) dans le rumen et
les fèces de chèvres recevant un régime riche en concentré**

*Kinetics of appearance, disappearance and survival of Yea-Sacc^{®1026}
(*Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) in the rumen and
feces of dairy goats fed a high concentrate diet*

**2. Effet d'une supplémentation en levures vivantes sur les activités
polysaccharidases dans le rumen de chèvres recevant un régime
riche en concentré**

*Effect of live yeast supplementation on ruminal polysaccharidase
activities in goats fed a high concentrate diet*

**3. Effet d'une supplémentation en levures vivantes sur la
biodiversité bactérienne du rumen de chèvres recevant un régime
riche en concentré**

*Effect of live yeasts on rumen bacterial diversity in lactating goats fed
a high concentrate diet*

Survie des levures dans l'organisme et influence des levures sur l'écosystème microbien ruminal

L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration de ruminants peut entraîner de l'acidose sub-clinique et une perturbation des fermentations ruminales. L'apport de levures vivantes pourrait permettre de limiter les variations des paramètres physico-chimiques du rumen en modifiant l'écosystème microbien ruminal.

Objectifs

- Déterminer les cinétiques d'apparition et de disparition des levures dans le rumen et les fèces des animaux en début et fin de supplémentation.
- Déterminer l'influence d'une supplémentation en levures sur l'activité enzymatique des micro-organismes du rumen
- Déterminer l'influence d'une supplémentation en levures sur la biodiversité de l'écosystème microbien.

Matériels et méthodes

Douze chèvres canulées, en milieu de lactation, réparties en deux groupes, ont reçu pendant 11 semaines un régime riche en concentré (50 %). La ration était distribuée deux fois par jour dans les proportions d'un tiers après la traite du matin et deux tiers après celle de l'après midi, conformément à l'intervalle de temps entre les traites. Après trois semaines de ce régime, six animaux ont reçu quotidiennement 10 g de levures ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) en deux apports égaux, avant chaque distribution.

Des prélèvements de contenu ruminal (0, 2, 6, 8, 12 et 24 h) et de fèces (0, 12, 24, 48 h et 3, 4, 6, 8, 10, 12 et 15 jours) ont été réalisés à partir de la première et de la dernière distribution de levures. Des prélèvements ont également été réalisés (0, 2 et 6 h après la distribution du matin) pendant 4 jours non consécutifs de la période de supplémentation.

Des sachets de nylon content du blé broyé ou du foin ont été incubés dans le rumen pendant 4 et 24 h, respectivement, et des échantillons de contenu ruminal ont été prélevés pendant 4 périodes distinctes. La première se situait avant la supplémentation en levures, les deux suivantes, pendant et la dernière, après l'arrêt de la supplémentation. Les activités de l'amylase, de la xylanase et de la cellulase associées à la phase solide ont été mesurées dans

les résidus provenant des sachets et sur le contenu ruminal. La biodiversité de l'écosystème microbien a été mesurée par DGGE.

Résultats

Le nombre de levures présentes dans le rumen était maximal dès 2 h après la première supplémentation et celui dans les fèces était maximal dès 12 h après la première supplémentation.

Les levures n'étaient plus détectables dans le rumen et dans les fèces des animaux trois jours après l'arrêt de la supplémentation

L'activité fibrolytique du contenu ruminal a été plus faible après le repas qu'avant, et pour les sachets contenant du blé que pour ceux contenant du foin. Des résultats inverses ont été obtenus pour l'activité amylolytique.

Les levures n'ont pas modifié les activités amylasique et xylanasiqque dans le rumen et dans les sachets, et l'activité cellulasique dans le rumen, mais ont eu tendance à diminuer l'activité cellulasique dans les sachets.

La biodiversité de l'écosystème microbien ruminal a eu tendance à être supérieure pendant la dernière semaine de supplémentation pour les animaux supplémentés par rapport aux témoins.

Discussion et conclusion

- Les levures doivent être apportées quotidiennement pour maintenir une population de levures vivantes dans le rumen et les fèces.

- Les levures ont eu peu d'influence sur les activités polysaccharidases du rumen, mais une très forte variabilité individuelle a été observée, ce qui peut expliquer ce résultat.

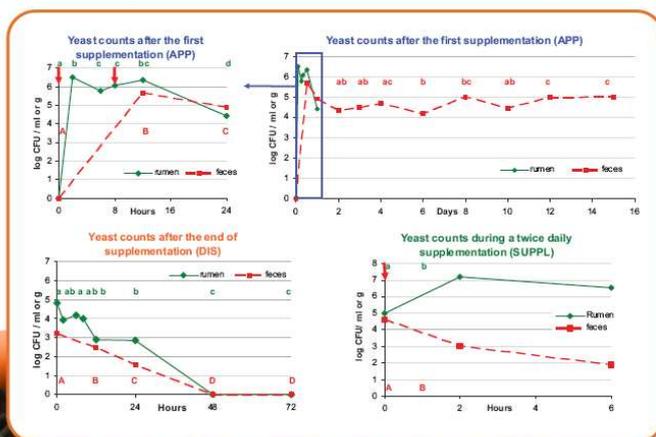
- La supplémentation en levures semble pouvoir augmenter la biodiversité de l'écosystème microbien, ce qui pourrait lui conférer plus de stabilité. Cet effet n'a cependant été détecté qu'après cinq semaines de supplémentation, ce qui met en évidence un temps d'adaptation du rumen relativement important.

1. Cinétiques d'apparition, survie et disparition de Yea-Sacc®1026 (*Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech) dans le rumen et les fèces de chèvres recevant un régime riche en concentré

Kinetics of appearance, disappearance and survival of Yea-Sacc®1026 (*Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) in the rumen and feces of dairy goats fed a high concentrate diet

Desnoyers, M.^{1,2}, Giger-Reverdin, S.¹, Duvaux-Ponter, C.¹ and Bertin, G.²

¹UMR AgroParisTech INRA Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude Bernard 75005 Paris and ²ALLTECH Reg. Dept. 14, Place Marie-Jeanne Bassot 92300 Levallois-Perret, France



Introduction

- Acidosis is very often detected in high producing dairy herds
- Yeast rumen supplementation may reduce the risk of acidosis in animals fed high concentrate diets but results are inconsistent

Objectives

- To describe the kinetics of yeast appearance (APP) and disappearance (DIS) following yeast supplementation
- To quantify daily evolution of yeast population during a twice daily supplementation (SUPPL)

Materials and Methods

- 6 cannulated dairy goats (Saanen and Alpine)
- Fed a high concentrate diet (50% concentrate)
- Receiving yeasts ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) twice daily (5 g at each feed distribution) for 5 weeks

Rumen samples

- **APP:** before the 1st supplementation and 2, 6, 8, 12, 24h after
- **SUPPL:** before the morning supplementation, 2 and 6h after, during 4 non consecutive days
- **DIS:** before the 1st feed distribution without yeast, 2, 6, 8, 12, 24, 48h, 3 and 4 days after

Fecal samples

- **APP:** before the 1st supplementation and 12, 24, 48h, 3, 4, 6, 8, 10, 12, and 15 days after
- **SUPPL:** before the morning supplementation and 2 and 6 hours after, during 4 non consecutive days
- **DIS:** before the 1st feed distribution without supplementation, 12, 24, 48h and 3, 4, 6, 8, 10, 12, and 15 days after

Results

- Statistical analyses were carried out using the mixed model procedure of SAS
- Red arrows indicate feed distribution and supplementations
- Different letters indicate statistical significance ($P < 0.05$)

Conclusion

- Yeast concentrations within the digestive tract are variable between days during supplementation.
- They become undetectable within three days following the cessation of supplementation.
- **Animals must be supplemented daily to maintain a live yeast population in the rumen and feces.**



2. Effet d'une supplémentation en levures vivantes sur les activités polysaccharidases dans le rumen de chèvres recevant un régime riche en concentré

Effect of live yeast supplementation on ruminal polysaccharidase activities in goats fed a high concentrate diet

M. Desnoyers^{*}, C. Martin^{}, C. Duvaux-Ponter^{*}, D.P. Morgavi^{**}, J.P. Jouany^{**}, D. Sauvant^{*}, G. Bertin^{***}, S. Giger-Reverdin^{*}**

^{}UMR INRA AgroParisTech Physiologie de la Nutrition et Alimentation,
16 rue Claude Bernard 75005 Paris-France*

*^{**}INRA, UR1213, 63122 Saint-Genès Champanelle-France*

*^{***}Alltech Reg. Affairs. Dept. 14 rue Marie-Jeanne Bassot 92593 Levallois -Perret Cedex-France*

Accepté pour publication dans Options Méditerranéennes.

SUMMARY- There is scarce information on the effect of yeast supplementation in dairy goats. The aim of this study was to determine the effect of live yeast supplementation on ruminal polysaccharidase activities in 12 mid-lactation goats receiving a high-concentrate diet. After three weeks of adaptation to the diet, six goats were yeast-supplemented (group Y) twice daily via rumen cannula during five weeks (10g/d, $2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech); the other animals were not supplemented (group C). Fibrolytic activity was lower in rumen contents after feeding than before and in nylon bags containing wheat than in those containing hay; the opposite results were obtained for amylolytic activity. Yeasts had no effect on amylase and xylanase activities in rumen contents or nylon bags and in cellulase activity in rumen contents, but tended ($P = 0.07$) to decrease cellulase activity in bag residues.

Key words: yeast, polysaccharidase activities, high concentrate diet, goats

RESUME – Peu d'informations sur les effets des levures chez les chèvres sont disponibles. Le but de cette étude était de déterminer les effets de levures vivantes sur les activités polysaccharidases ruminales de 12 chèvres laitières recevant un régime riche en concentré. Après trois semaines d'adaptation au régime, six chèvres (groupe Y) ont reçu 10g/j d'un supplément comprenant $2,2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae* (CBS 493.94, Alltech) pendant cinq semaines, via la canule, en deux apports journaliers. Les autres animaux (groupe C) n'ont pas été supplémentés. L'activité fibrolytique du contenu ruminal a été inférieure après le repas qu'avant, et pour les sachets contenant du blé que ceux contenant du foin ; des résultats inverses ont été obtenus pour l'activité amylolytique. Les levures n'ont pas modifié les activités amyliques ou xylaniques dans le rumen et les sachets, et l'activité cellulosique dans le rumen, mais ont eu tendance ($P=0,07$) à diminuer l'activité cellulosique dans les sachets.

Mots-clés: levures, activités polysaccharidases, régimes riches en concentré, chèvres

INTRODUCTION

A major negative consequence of feeding high concentrate diets to high producing ruminants is the occurrence of sub-acute ruminal acidosis. Yeast supplementation may modify rumen fermentation and limit rumen pH decreases associated with these diets (Giger-Reverdin *et al.*, 2004; Sauvant *et al.*, 2006). The effects of yeast supplementation on intake, milk production and ruminal parameters are, however, variable and seem to be influenced by factors related to the animal (physiological state, days in milk, species), to the diet (type and percentage of concentrate, mode of distribution) and to the yeast (strain, dose and mode of distribution) (Brossard, 2004; Sauvant *et al.*, 2004). The effects of acidosis and yeast supplementation on digestion and metabolism are frequently studied, however there is less information on rumen microbial parameters and scarce information on the effect of yeast supplementation, in dairy goats.

The aim of this study was to determine if live yeast supplementation can influence rumen polysaccharidase activities (amylase, xylanase and cellulase) in dairy goats receiving a high-concentrate diet.

MATERIALS AND METHODS

Animals, housing, and diet

Twelve rumen-fistulated dairy goats (Saanen and Alpine) in mid lactation (35 ± 4.4 days in milk), averaging 65 ± 6.5 kg body weight and producing 3.5 ± 0.54 kg milk per day at the start of the experiment were used. They were allocated into two groups according to the previous lactation, body weight after parturition, breed and intake kinetics measured during gestation. The experimental design had a 3-week period of adaptation to the high-concentrate diet (P1), followed by a 5-week yeast supplementation period (P2) during which the yeast group (Y) received 10 g of yeast daily via rumen cannula ($2.2 \cdot 10^{10}$ CFU/g *Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech) given as two separate 5 g doses at each feeding, whereas the control group (C) was not yeast-supplemented. A final 3-week period (P3) during which the two groups were still fed the high-concentrate diet ended the design. Goats were housed in 2x1 m individual pens during experiment with free access to water. A total mixed ration of grass hay (25 %), sugarbeet pulp silage (25 %) and concentrate (50 %) was offered *ad libitum* twice a day after milking, in the proportion of two thirds at 1600 h and one third at 0800 h.

The concentrate was composed of wheat (25 %), barley (25 %), maize (30 %), soyabean meal (15 %) and a vitamin and mineral mixture.

Sampling procedure

Samples of rumen content were taken before (T0) or four hours after (T4) the morning feeding.

Nylon bags containing ground wheat grain or gramineae hay were incubated in the rumen for 4 and 24 h respectively. Gramineae hay was incubated for 24 h because differences between polysaccharidase activities measured in nylon bags and polysaccharidase activities measured in rumen digesta are lower after 23 h incubation than after 2 h (Noziere and Michalet Doreau, 1996). Ground wheat grain was only incubated for 4 hours because after 4 h the whole ground grain would have been degraded. Samplings of rumen content and incubations of bags were performed during four one-week periods, one before yeast supplementation, two during supplementation and one after supplementation. Solid-associated amylase, xylanase and cellulase activities were measured in both rumen content and nylon bag residues according to the method described by Martin and Michalet-Doreau (1995). Enzyme activities were expressed as μmol reducing sugar released per mg protein per hour.

Statistical analysis

Statistical analyses were carried out using the mixed model procedure of SAS (2002) with animal as a random effect. Effects of group (Y or C), rumen content sampling time (T0 or T4) or type of substrate incubated in nylon bags (wheat or hay) and their interactions were tested during the supplementation period (P2). Analysis included the values obtained for each goat during the first period (P1 without supplementation) as a covariable in the model. Significance was declared at $P < 0.05$ and trends were discussed at $P < 0.10$.

RESULTS AND DISCUSSION

Daily variation of intake (41.2 ± 9.09 g DM /kg body weight), milk production (3358 ± 857.5 g) and rumen pH (6.2 ± 0.24 with 0.6 ± 4.57 % of the time below pH = 5.0) showed that most goats experienced acidosis bouts during the experiment. However, there was a marked individual variability with some animals being more susceptible than others, independent of treatment.

Feeding effects of a high-concentrate diet on ruminal polysaccharidase activities

Solid-associated amylolytic activity extracted from rumen contents increased after feeding, and the opposite was observed for fibrolytic activities (cellulase and xylanase) (Table 1).

Table 1. Effect of feeding (T0: before and T4: 4h after) on solid-associated polysaccharidase activities ($\mu\text{mol reducing sugar}\cdot\text{mg protein}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) in the rumen of 12 lactating dairy goats fed a high-concentrate diet.

	T0	T4	SEM	P
Amylase	8.8	11.8	0.89	**
Xylanase	5.9	2.1	0.35	***
Cellulase	0.7	0.3	0.07	**

NS: $P>0.1$, * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$.

These results are in accordance with those reported in sheep and cows (Martin *et al.*, 1993; Martin *et al.*, 2001; Michalet-Doreau *et al.*, 2002; Brossard, 2004) and indicate that starch-degrading micro-organisms develop rapidly after feeding a cereal-rich diet, whereas plant cell wall degrading micro-organisms, producers of fibrolytic enzymes, grow more slowly.

For the solid-associated polysaccharidases present in nylon bags, fibrolytic (cellulase and xylanase) activities were higher in bags containing hay than in those containing wheat, and the opposite was observed for amylolytic activity (Table 2).

Table 2. Polysaccharidase activities ($\mu\text{mol reducing sugar}\cdot\text{mg protein}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) in wheat or hay incubated in nylon bags, for 4 and 24 hours respectively, in the rumen of 12 lactating dairy goats fed a high-concentrate diet

	Wheat	Hay	SEM	P
Amylase	11.6	1.4	0.55	***
Xylanase	0.9	13.1	0.69	***
Cellulase	0.2	0.8	0.10	***

NS: $P>0.1$, * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$.

Our results show that fibrous substrates are colonized more by fibrolytic micro-organisms and that starchy substrates are colonized more by amylolytic microorganisms, which support those of Martin *et al.* (2001).

Effect of yeast supplementation

When the two groups of animals (Y and C) were compared during the P2 period, yeast supplementation had no effect on the solid-associated amylase, xylanase and cellulase activities from rumen contents ($P > 0.10$) (Table 3).

Table 3. Effect of live yeast supplementation on polysaccharidase specific activities (μmol reducing sugar. $\text{mg protein}^{-1}.\text{h}^{-1}$) in rumen contents sampled before (T0) or four hours after (T4) the morning feeding from 12 lactating goats fed a high-concentrate diet

	Yeast		Control		SEM	Significance			
	T0	T4	T0	T4		G	T	GxT	P1
Amylase	8.5	13.1	10.4	11.8	2.1	NS	NS	NS	NS
Xylanase	4.9	2.1	6.4	2.4	0.8	NS	***	NS	0.07
Cellulase	0.5	0.5	0.8	0.6	0.2	NS	NS	NS	NS

G: group; T: time of sampling; P1: results during the first period

NS: $P > 0.1$, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

Yeast supplementation also had no effect on the solid-associated amylase and xylanase activities from nylon bag residues ($P > 0.10$). However, it tended to decrease the solid-associated cellulolytic activity ($P = 0.07$) extracted from hay incubated in nylon bags (Table 4).

Except for the latter, our results are similar to those of Brossard (2004) who found no effect of yeast supplementation on solid-associated amylase, cellulase or xylanase activities from the rumen of sheep fed a high-concentrate diet (60 % wheat), before and three hours after the feed supply. In contrast, they differ from the results of Jouany *et al.* (1999) who showed, in sheep fed a mixed diet (45 % concentrate), that cellulase and xylanase activities were stimulated by yeast supplementation before the morning meal and in hay incubated in nylon bags during 24 h.

Table 4 Effect of live yeast supplementation on polysaccharidase specific activities (μmol reducing sugar. $\text{mg protein}^{-1}.\text{h}^{-1}$) in nylon bags containing wheat or hay sampled from 12 lactating goats fed a high-concentrate diet

	Yeast		Control		SEM	Significance			
	Wheat	Hay	Wheat	Hay		G	S	GxS	P1
Amylase	13.1	0.0	15.1	0.0	1.4	NS	***	NS	*
Xylanase	1.8	13.6	2.1	13.6	1.6	NS	***	NS	NS
Cellulase	0.0	0.7	0.3	1.0	0.2	0.07	**	NS	NS

G: group; S: Substrate in nylon bag; P1: results during the first period

NS: $P > 0.1$, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

The marked individual variability observed during this experiment for all the measured parameters, which seemed to be characteristic of experiments with goats experiencing sub-clinical acidosis (Giger-Reverdin *et al.*, 2005), might have limited the detection of yeast effects on the activity of rumen micro-organisms. Some of the goats also experienced acute acidosis bouts of short duration but the experiment was not designed to test the possible effect of acidosis bouts on polysaccharidase activities.

CONCLUSION

Post-prandial evolution of polysaccharidase activities in the rumen of dairy goats fed a high-concentrate diet was similar to previous observations, and yeast ruminal supplementation had no effect on solid-associated amylase or xylanase activities isolated from rumen contents or nylon bags containing hay or wheat. Cellulase activity tended to be reduced by yeast supplementation in nylon bag residues but this result has to be confirmed.

The absence of an effect of yeasts on all the tested polysaccharidase activities could be due to the high individual variability observed and the low number of animals. Further analysis to characterise the rumen microbial population as well as the physiology and behaviour of these animals are currently in progress.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge Alltech Inc. (Lexington, KY) for their financial support to this project. They thank I. Kerveillant, J. Tessier, A. Aymard, J. Chevallier, G. Durandet, M. Langot and A. Severin for their technical assistance during the experiment.

REFERENCES

- Brossard, L. (2004). Compréhension de l'évolution de l'acidose ruminale latente et prévention par l'addition de levures vivantes (*Saccharomyces cerevisiae* I-1077, LevucellR SC). PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Rennes.
- Giger-Reverdin, S., Sauvant, D., Tessier, J., Bertin, G. and Morand-Fehr, P. (2004). Effect of live yeast culture supplementation on rumen fermentation in lactating dairy goats. *S. Afri. J. Anim. Sci.* 34 (Suppl. 1): 59-61.
- Giger-Reverdin, S., Desnoyers, M. and Sauvant, D. (2005). Etude de la variabilité individuelle de chèvres laitières à des régimes plus ou moins acidogènes. In 12èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France. 2005/12/07-08, 252
- Jouany, J.-P., Mathieu, F., Senaud, J., Bohatier, J., Bertin, G. and Mercier, M. (1999). Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on the population of rumen microbes and their polysaccharidase activities. *S. Afri. J. Anim. Sci.* 29: 6-7.
- Martin, C., Michalet-Doreau, B., Fonty, G. and Williams, A. (1993). Postprandial variations in the activity of polysaccharide-degrading enzymes of fluid- and particle-associated ruminal microbial population. *Curr. Microbiol.* 27: 223-228.
- Martin, C. and Michalet-doreau, B. (1995). Variations in mass and enzyme-activity of rumen microorganisms - effect of barley and buffer supplements. *J. Sci. Food Agric.* 67: 407-413.
- Martin, C., Millet, L., Fonty, G. and Michalet-Doreau, B. (2001). Cereal supplementation modified the fibrolytic activity but not the structure of the cellulolytic bacterial community associated with rumen solid digesta. *Reprod. Nutr. Dev.* 41: 413-424.
- Michalet-Doreau, B., Fernandez, I. and Fonty, G. (2002). A comparison of enzymatic and molecular approaches to characterize the cellulolytic microbial ecosystems of the rumen and the cecum. *J. Anim. Sci.* 80: 790-796.
- Noziere, P. and Michalet Doreau, B. (1996). Validation of in sacco method: Influence of sampling site, nylon bag or rumen contents, on fibrolytic activity of solid-associated

- microorganisms. *Anim. Feed Sci. Technol.* 57: 203-210.
- SAS. (2002). *Guide for Personal computers, Version 9.1.* SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S. and Schmidely, P. (2004). Rumen acidosis: modeling ruminant response to yeast culture. In: *re-imagining the feed industry. Nutritional biotechnology in the feed and food industries. Proceedings of Alltech's 20th Annual Symposium*, Jacques, K.A. (eds). Nottingham University Press. pp. 221-229
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S. and Meschy, F. (2006). Le contrôle de l'acidose ruminale latente. *Prod. Anim.* 19: 69-78.

3. Effet d'une supplémentation en levures vivantes sur la biodiversité bactérienne du rumen de chèvres recevant un régime riche en concentré

Effect of live yeasts on rumen bacterial diversity in lactating goats fed a high concentrate diet

M. Desnoyers¹, Morgavi D.P.², Giger-Reverdin¹ S., Bertin G.³, Jouany J.P.², Martin C.²

¹INRA-AgroParisTech, UMR791 Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 75005 Paris, France,

²INRA, UR1213 Herbivores, 63122 Saint-Genès Champanelle, France,

³Alltech France, 92300 Levallois-Perret, France

Accepté pour le 6^{ème} symposium INRA-RRI, 18 au 20 juin 2008, Clermont Ferrand.

Accepté dans Proceedings of the Nutrition Society

Rumen microbial diversity plays an important role in rumen function, nutrition and animal health. High concentrate diets used in modern, intensive ruminant production systems may decrease microbial diversity leading, for example, to an increased risk of acidosis. This negative effect might be alleviated by yeast supplementation. The aim of this study was to assess the effect of live yeast supplementation on rumen bacteria in lactating dairy goats fed a high concentrate diet. Twelve rumen-cannulated goats (allotted in two groups of 6 animals) were fed a diet containing 50% grain concentrate for 11 wk. Animals had a 3-week adaptation period (P1), followed by a 5-week yeast supplementation period (P2) during which the yeast group received 10 g of yeast daily via the rumen cannula (2.2×10^{10} CFU/g *Saccharomyces cerevisiae* CBS 493.94, Alltech). On the final 3-week period (P3), the two groups were fed the same diet without yeast supplementation. Samples of rumen fluid were taken in wk 3 for P1, wk 6 and 8 for P2, and wk 11 for P3. The bacterial community was checked by a genetic fingerprinting technique, 16S rDNA Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE)¹. From the DGGE profiles the similarity matrix was evaluated as dendrograms and the biodiversity indexes of Shannon (H), evenness (e) and dominance (c) were calculated.

The group effect was tested on each separated sampling week. Biodiversity indexes and dendrogram analysis of DGGE fingerprints showed no difference between the two groups in P1. In P2, yeast supplementation had no effect after 3 weeks of distribution (wk 6) but tended to increase the Shannon's index at 5 weeks (wk 8) compared to the control group (H = 2.03 vs 1.65, respectively; P=0.08). Additionally, the dendrogram analysis after wk 8 clustered together the majority of samples from supplemented animals ($P < 0.05$, permutation test). These samples also had less within-group variability than samples from the non-supplemented group. The differences between the two groups disappeared in week 11, i.e. 3 weeks after the end of yeast supplementation.

In this trial, yeast supplementation seemed to improve bacterial diversity and decrease the animal-to-animal bacterial community variability in dairy goats. This positive effect was observed after a daily supplementation of live yeasts for 5 weeks and disappeared soon after supplementation stopped.

1. Sadet S, Martin C, Meunier B & Morgavi DP (2007) *Animal* 1, 939-944.

Mots-clés : rumen, yeast, bacterial diversity, DGGE, goat

CHAPITRE 7

Discussion générale

CHAPITRE 7 : Discussion générale

1. CONSEQUENCES ANALYTIQUES DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1.1. Différentes échelles de temps disponibles

Des mesures de l'ingestion, du pH ruminal, de la mastication et du budget temps ont été réalisées en continu tout au long des expériences. De nombreux autres paramètres ont cependant été mesurés de manière plus ponctuelle, et les échelles de temps vont de une à deux minutes (mastication, ingestion et pH ruminal), à la journée (ingestion, production laitière), à la semaine (composition du lait, poids vif) ou à des intervalles de 2, 3 ou 4 semaines (paramètres sanguins, ruminiaux et microbiologiques). Ces échelles de temps variées permettent d'appréhender les résultats de différentes manières, et de progresser de l'analyse d'un effet global à l'échelle de la semaine ou d'une période de 3 à 5 semaines, à l'analyse de plus en plus précise à l'échelle de la journée, ou même intra-jour pour étudier l'évolution au cours du nyctémère. L'analyse de certains paramètres mesurés avec un pas de temps court peut permettre de mieux comprendre les résultats obtenus à l'échelle de la semaine ou de plusieurs semaines.

Certaines mesures effectuées à la minute doivent néanmoins être associées, pour leur analyse, à des paramètres mesurés moins souvent, tels que le poids vif (pour le calcul de la MSI rapportée au kg de PV) ou la composition du lait, ce qui peut induire une certaine imprécision dans les résultats, car la valeur de ce paramètre mesuré moins souvent est considérée comme constante pendant une semaine. Ceci a peu d'influence si le système étudié est stable et si les traitements expérimentaux n'influencent pas de manière importante les paramètres mesurés peu souvent. En revanche, le risque d'erreurs ou de biais est d'autant plus élevé qu'il existe des perturbations importantes de ces paramètres peu mesurés, ce qui a été observé dans la présente étude. La caractérisation de ces perturbations, permet, néanmoins, de déterminer les mesures qui semblent être biaisées et donc de décider de les corriger, de les éliminer, ou de les conserver. Ainsi, les valeurs obtenues avec quelques paramètres hebdomadaires présentant des valeurs extrêmes ont été retirées pour les analyses.

L'interprétation de certains phénomènes observés à l'échelle de la journée ou intra-jour nécessite, également, le recours à des paramètres moins souvent mesurés (tels que les

paramètres physiologiques ruminiaux et sanguins), ce qui peut rendre les analyses délicates lorsque ces paramètres n'ont malheureusement pas été mesurés au moment qui, *a posteriori*, aurait été le plus intéressant. Comme cela a déjà été évoqué, les différences d'échelle de temps auront peu d'importance dans le cas d'un système stable ou qui évolue lentement. En revanche, l'interprétation des résultats à partir de paramètres mesurés moins souvent est d'autant plus délicate que ces paramètres peuvent être modifiés de manière importante et ponctuelle. Dans la présente étude, les régimes utilisés ont induit des perturbations de type "acidose" très importantes, brèves, et qui ont modifié, ponctuellement ou durablement, la majorité des paramètres mesurés, ce qui rend l'interprétation de certains résultats délicate.

En revanche, le nombre important de paramètres mesurés, ainsi que les fréquences élevées de mesures pour certains paramètres, ont permis d'obtenir suffisamment de données pour permettre de relativement bien définir les perturbations de type acidose rencontrées, et donc de pouvoir dissocier, en grande partie, la variabilité due aux épisodes d'acidose, de celle engendrée par le régime, par les individus, ou par la distribution de levures. La réalisation de mesures encore plus fréquentes de certains paramètres aurait néanmoins certainement permis une analyse encore plus précise des phénomènes observés.

1.2. Nécessité d'intégrer les crises d'acidose dans les analyses

Tous les résultats présentés dans ce travail montrent que les crises d'acidose ont une influence très importante sur la plupart des paramètres mesurés. Cela met en évidence la nécessité de prendre en compte ces crises d'acidose dans l'analyse statistique des résultats des expériences réalisées avec des régimes riches en concentré ou acidogènes. En effet, l'influence de l'acidose a été plus importante que celle des levures ou du régime pour la majorité des paramètres testés. Une analyse de l'effet du régime ou des levures, sans prendre en compte ces crises d'acidose, entraînait d'ailleurs des résultats très différents, ce qui était certainement dû à une confusion d'effets entre acidose et facteur expérimental (régime ou levure). Ceci peut expliquer, du moins en partie, la très grande variabilité des résultats obtenus dans la littérature, par exemple en ce qui concerne les effets de la supplémentation en levures, car certaines expériences ont pu entraîner des épisodes d'acidose non détectés ou non intégrés dans l'analyse.

Cependant, la prise en compte de ces crises d'acidose dans les analyses statistiques pose le problème de leur détection et de leur codage. En effet, un codage global, représentant la crise

dans son ensemble, et utilisant simultanément différents paramètres modifiés lors d'une crise, c'est-à-dire pH, ingestion et production dans notre analyse, n'est pertinent que pour étudier les paramètres autres que ceux qui ont servi à la détermination des crises. En revanche, le fait que les chutes de ces trois paramètres soient décalées dans le temps rend le codage global peu pertinent pour l'analyse statistique de ces trois paramètres. En effet, lorsque, par exemple à un jour J, la MSI est très faible, la production laitière peut ne pas encore avoir chuté tandis que le pH est déjà remonté. Ce jour J peut donc apparaître statistiquement aberrant pour la MSI, par rapport aux jours où l'animal ingère à son potentiel, et doit être traité de manière spécifique. En revanche, ce même jour J n'apparaît pas statistiquement aberrant pour la production laitière et le pH et devrait donc être traité comme tous les autres jours. Il a donc été choisi de réaliser un codage spécifique pour chacun de ces trois paramètres. Ce codage spécifique permet, à la fois, de représenter l'intensité de la déviation, et de différencier les jours pour lesquels les valeurs sont faibles de ceux pour lesquels elles sont élevées. Ce codage nous a permis d'analyser les effets du régime ou de l'apport de levures, sans confusion d'effets avec les chutes de pH, d'ingestion et de production induites par les acidoses. Cependant, l'effet de l'acidose tel qu'il est analysé grâce à ces codages met en avant les déviations brutales et ponctuelles des paramètres et non le phénomène global des épisodes tel qu'il a été décrit au chapitre 3.1.

Les codages utilisés pour cette étude ont principalement été choisis afin de dissocier les effets de l'acidose de ceux du régime ou des levures et d'éviter les confusions d'effets. Nous sommes, en revanche, conscients que leur choix est discutable, et que d'autres codages auraient pu entraîner des résultats différents, sans pour autant modifier les principales conclusions.

La réalisation de mesures à différentes échelles de temps a permis d'optimiser le nombre de paramètres étudiés, mais ce type d'approche rend l'analyse délicate lorsque les paramètres mesurés de manière plus ponctuelle peuvent avoir des valeurs brutalement modifiées.

En particulier, la forte influence des crises d'acidose, observée sur tous les paramètres mesurés, a montré qu'il était indispensable de prendre en compte ces crises dans les interprétations des phénomènes et les analyses des autres facteurs expérimentaux afin d'éviter d'attribuer un effet dû à l'acidose, au régime, à la supplémentation, ou à la variabilité individuelle.

2. POURCENTAGE DE CONCENTRE ET ACIDOSE

2.1. Effet du pourcentage de concentré dans le régime

La première expérience (chapitre 2.1) étudiant l'influence du pourcentage de concentré dans la ration de chèvres laitières a montré que l'augmentation du pourcentage de concentré a augmenté les quantités ingérées et la production laitière des animaux, ce qui est cohérent avec de nombreux résultats de la littérature (Nelson *et al.*, 1968 ; Hernandez-Urdaneta *et al.*, 1976 ; Macleod *et al.*, 1983). Les deux régimes ont cependant induit de l'acidose sub-clinique, ce qui peut être dû à la forte proportion d'aliments potentiellement acidogènes dans ces régimes (23,4 % pulpe + 30 % concentré vs 13,4 % pulpe et 60 % concentré). Dans cette expérience, les animaux ont passé moins de temps à ingérer et moins de temps à ruminer lorsque le pourcentage de concentré augmentait, ce qui est cohérent avec de nombreux résultats de la littérature (Focant, 1984 ; Dulphy et Carle, 1986 ; Kawas *et al.*, 1991 ; Carvalho *et al.*, 2006). Ces différences de comportement ont résulté essentiellement d'une diminution des activités d'ingestion dans les intervalles comprenant les distributions, et d'une diminution de la rumination diurne, ce qui est également cohérent avec des résultats déjà observés (Focant, 1984 ; Abijaoudé *et al.*, 2000a).

L'expérience suivante (chapitres 3, 4, 5 et 6) a également été réalisée avec deux régimes différant par leurs pourcentages de concentrés, mais ces régimes étaient moins concentrés que ceux utilisés pour la première expérience (chapitre 2.1) (29 % pulpe + 20 % concentré pour le régime L et 15 % pulpe + 50 % concentré pour le régime H, respectivement), et la différence entre les deux régimes était plus faible (16 % d'aliments acidogènes vs. 20 %). L'augmentation du pourcentage de concentré dans le régime des chèvres a entraîné des effets différents de ceux obtenus au chapitre 2.1. En effet, la MSI a été diminuée et la production laitière brute a été augmentée lorsque la MSI était incluse dans le modèle. Le régime H était relativement énergétique (0,91 UFL / kg MS) ce qui pourrait expliquer la baisse d'ingestion observée sur ce régime. En effet, lorsque la concentration énergétique du régime dépasse un certain seuil, la MSI diminue pour conserver un apport d'énergie constant, ce qui correspond à une régulation métabolique de l'appétit (Montgomery et Baumgardt, 1965a ; 1965b). En revanche, il est étonnant que ce phénomène n'ait pas été observé pour l'expérience présentée au chapitre 2.1 avec un pourcentage de concentré supérieur. Comme pour l'expérience décrite au chapitre 2.1. et malgré des pourcentages de concentrés légèrement inférieurs, les deux régimes de l'expérimentation des chapitres 3, 4, 5 et 6 se sont, à nouveau, révélés acidogènes

et le régime H a seulement eu tendance à diminuer le pH moyen ruminal par rapport au régime L. Ces résultats peuvent être dus aux différents codages utilisés pour l'analyse des paramètres zootechniques et du pH ruminal qui pouvaient traiter de manière similaire les variations brutales dues aux crises d'acidose et la variabilité intrinsèque élevée des données. En effet, dans l'expérience présentée au chapitre 2.1, la variabilité inter-jours de l'ingestion était plus élevée pour le régime riche en concentré que pour celui moins riche en concentré. Si cela a également été le cas dans l'expérience analysée au chapitre 4.1, une partie de cette variabilité a certainement été incluse dans le codage, et a donc pu être assimilée à de l'acidose.

L'analyse des durées quotidiennes de comportement alimentaire n'a montré une influence du régime que sur la durée totale de rumination, ce qui est surprenant par rapport à de nombreuses données de la littérature montrant une diminution simultanée de l'ingestion et de la rumination lorsque le pourcentage de concentré augmente (Focant, 1984 ; Dulphy et Carle, 1986 ; Kawas *et al.*, 1991 ; Abijaoudé *et al.*, 2000b ; Carvalho *et al.*, 2006). De plus, la diminution de la durée totale de rumination a principalement été due à une diminution de la rumination nocturne, ce qui est contraire aux résultats du chapitre 2.1 et à la littérature (Focant, 1984 ; Jarrige *et al.*, 1995). Ces derniers auteurs ont, en effet, montré que la rumination semble être stimulée par l'obscurité, et qu'une diminution de la durée totale de rumination est principalement due à une diminution des périodes de rumination diurnes. Notre résultat pourrait s'expliquer par le fait que les chèvres étaient éclairées la nuit pour permettre les enregistrements vidéo. Cependant, un résultat similaire aurait alors dû être observé pendant l'expérience présentée au chapitre 2.1. Ces différences sont donc difficiles à expliquer.

Le peu d'influence du régime observé sur les paramètres de l'ingestion (durée d'ingestion, répartition au cours du temps et repas) peut être dû au fait que les deux régimes s'étant révélés acidogènes, les chèvres ont pu modifier leur comportement d'ingestion dès la distribution du régime moins concentré, afin d'adapter leur comportement alimentaire aux perturbations ruminales de type acidose. De plus, la plupart des données disponibles avec le régime moins concentré ont été obtenues pendant la dernière partie de l'expérience, après la distribution du régime acidogène pendant 11 semaines. Même si l'expérience présentée au chapitre 2.1 n'avait pas permis de montrer un effet rémanent du régime riche en concentré sur le comportement des animaux, il se peut que les nombreuses crises d'acidose observées au cours de l'expérience aient modifié durablement leur comportement alimentaire. Ceci pourrait expliquer le peu de différences observées dans l'organisation des activités au cours de la journée.

L'analyse des cinétiques d'ingestion et de rumination a, de plus, montré que le comportement alimentaire individuel était très variable, et que chaque type de comportement extrême pouvait être observé avec les deux régimes expérimentaux. La variabilité inter-individus et inter-jours du comportement alimentaire semble donc supérieure à la variabilité résultant du changement de régime, et pourrait l'avoir masquée. Enfin, cette analyse a montré que certaines chèvres ont modifié leur comportement au cours de l'expérience, et semblent donc avoir adapté leur comportement alimentaire au régime, tandis que d'autres n'ont pas modifié leur comportement, suite au changement de régime. Tout ceci peut, également, expliquer que les analyses réalisées « toutes chèvres confondues » n'ont montré que peu d'effets de la modification du pourcentage de concentré sur le comportement alimentaire. Une analyse individuelle plus poussée pourrait permettre de déterminer si certains animaux montrent un comportement alimentaire plus sensible aux modifications de régime que d'autres.

2.2. Acidose sub-clinique et crises spontanées d'acidose

2.2.1. Induction d'acidose

L'acidose, ou du moins les chutes d'ingestions (« off-feed ») dues à des régimes riches en concentré, est observée depuis longtemps dans les élevages intensifs de ruminants (Uhart et Carroll, 1967 ; Tremere *et al.*, 1968 ; Baile et Mayer, 1969). De nombreuses revues (Owens *et al.*, 1998 ; Kleen *et al.*, 2003 ; Krause et Oetzel, 2005 ; Martin *et al.*, 2006 ; Peyraud et Apper-Bossard, 2006 ; Sauvart *et al.*, 2006) ont décrit les principales causes et conséquences de l'acidose dans les troupeaux de ruminants élevés de manière intensive. Cependant, la principale caractéristique de l'acidose sub-clinique étant une instabilité des fermentations ruminales et des paramètres zootechniques, son étude est délicate. De nombreux auteurs ont induit des acidoses sub-cliniques ou aiguës de manière brutale : par remplacement de 25 % de la ration complète (33 % concentré) par des concentrés sans transition chez des vaches laitières (Keunen *et al.*, 2002), par ajout de 3 à 5 kg de concentré à la ration après une période de restriction chez des vaches laitières (Krause et Oetzel, 2005), par la distribution d'un régime à 70 % de concentré, sans transition chez des bovins en croissance (Harmon *et al.*, 1985), par un apport intra-ruminal d'une quantité plus ou moins importante de concentrés (1,5 ou 3 % du poids vif) chez des bovins en croissance (Brown *et al.*, 2000), ou de farine de

sorgho chez des boucs (50 g / kg PV, Mohamed Nour *et al.*, 1999), par injection intraruminale de glucose chez des moutons (0, 6, 12 ou 18 g / kg PV, Krehbiel *et al.*, 1995) ou des bovins en croissance (12 g / kg PV, Harmon *et al.*, 1985), par injection orale de blé trempé chez des moutons (90 g / kg PV, Patra *et al.*, 1996), ou de saccharose chez des chèvres tarées (18 g / kg PV, Cao *et al.*, 1987) ou des moutons (15 g / kg PV, Kezar et Church, 1979).

Les expériences induisant de l'acidose par une modification rapide du régime chez des vaches laitières (Keunen *et al.*, 2002 ; Krause et Oetzel, 2005) ont permis d'induire une diminution du pH ruminal ou une augmentation du temps passé sous pH 6,0, sans chute d'ingestion ou de production, et donc une situation, *a priori*, assimilable à de l'acidose sub-clinique. En revanche, l'apport brutal d'un régime riche en concentré à des bovins en croissance nourris avec une ration à base de foin entraîne une chute très nette d'ingestion le deuxième jour, mais une diminution du pH ruminal moyen relativement lente pour atteindre un minimum d'environ 5,8 unité pH, 14 h après la distribution du régime riche en concentré (Harmon *et al.*, 1985). Cette situation semble donc caractéristique des « off-feed » et est relativement différente de celles décrites précédemment. Les expériences introduisant directement des glucides dans le rumen (oralement ou par la canule) d'animaux non en lactation ont induit des acidoses que l'on peut qualifier d'aiguës, généralement associées à des modifications majeures des paramètres ruminiaux et sanguins (Kezar et Church, 1979 ; Cao *et al.*, 1987 ; Krehbiel *et al.*, 1995a ; Patra *et al.*, 1996 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999).

Mises à part les deux expériences réalisées sur vaches laitières (Keunen *et al.*, 2002 ; Krause et Oetzel, 2005), ces méthodes permettent donc d'étudier les modifications physiologiques résultant d'une acidose aiguë, mais ne permettent pas d'étudier ou de représenter ce qui est observé plus couramment en élevage. Harmon *et al.* (1985) ont choisi, chez des bovins en croissance, de simuler une acidose aiguë par une injection intraruminale de glucose et une acidose sub-clinique par la distribution à volonté d'un régime à 70 % de concentré pendant 48 h. Même si la transition vers le régime riche en concentré, à partir d'un régime à base de foin, a été très brutale, cette expérience souligne que les auteurs considéraient que l'acidose sub-clinique représentait un état de perturbation chronique, dans lequel les animaux peuvent limiter leur ingestion, tandis que l'acidose aiguë correspond à une déviation fermentaire ruminale ponctuelle et intense, que l'on peut induire.

2.2.2. *Episodes d'acidose spontanés*

Toutes les situations décrites dans les expériences citées ci-dessus sont relativement différentes des épisodes observés chez les animaux utilisés dans cette thèse, et décrits plus précisément au chapitre 3.1, ou observés en élevage. Ainsi, Brugère (2003) définit l'acidose sub-clinique ou latente comme un trouble sans symptômes directement évocateurs des troubles digestifs ou rappelant ceux observés dans les formes aiguës, ou comme un syndrome dans lequel l'acidose du rumen joue un rôle déterminant, sans que la mesure du pH ruminal ne puisse, à tout moment, montrer une déviation caractéristique. Oetzel (2000) rapporte également que le principal symptôme d'une acidose sub-clinique se limite à la chute d'ingestion. Très peu d'animaux utilisés dans cette thèse ont présenté des signes cliniques importants d'acidose, hormis une chèvre du lot levures qui est morte juste après l'arrêt de la supplémentation (début de période P4), suite à une diarrhée et à une déshydratation très importantes. Les principaux signes observés ont été des chutes brutales d'ingestion et de production, dont le retour aux valeurs initiales pouvait prendre plus ou moins longtemps. Malgré le peu de symptômes importants réellement observés au moment de l'expérience, vingt-cinq épisodes d'acidose ont pu être mis en évidence pendant les onze semaines durant lesquelles les animaux ont reçu le régime riche en concentré.

L'analyse de ces épisodes (chapitre 3.1) a confirmé que l'acidose sub-clinique, telle qu'elle apparaît en élevage, donc non induite artificiellement, semble être principalement caractérisée par un état d'équilibre (précaire ?) sans symptômes, et durant lequel les animaux ingèrent et produisent à leur potentiel. Cet état d'équilibre est entrecoupé de crises ponctuelles plus ou moins importantes, et plus ou moins longues, et dont le déclenchement semble imprévisible. Ces observations confirment celles de Martin *et al.* (2006) décrivant l'acidose sub-clinique comme difficilement caractérisable, si ce n'est par son instabilité, le rumen étant en état de déséquilibre de manière transitoire, mais plus ou moins fréquente. Ces crises peuvent cependant avoir des répercussions sur la production et la santé de l'animal pendant plus de trois semaines, ce qui peut entraîner des pertes économiques non négligeables pour les éleveurs.

2.2.3. *Acidose ou « off-feed period » ?*

Dans la littérature, les épisodes d'acidose induits par un apport important et brutal de glucides rapidement fermentescibles dans le rumen sont caractérisés par des chutes de pH ruminal plus ou moins importantes. De même, l'acidose est principalement définie par des

valeurs faibles du pH ruminal moyen (Sauvant *et al.*, 2004), des durées importantes sous des pH de 6,0 ou 5,5 (Maekawa *et al.*, 2002b ; Beauchemin *et al.*, 2003 ; Dragomir *et al.*, 2008), ou des pH minimum faibles (Bauer *et al.*, 1995 ; Krehbiel *et al.*, 1995a). Dans la présente analyse, les épisodes décrits au chapitre 3.1 sont caractérisés par une chute de pH très ponctuelle, suivie d'une période pendant laquelle le pH est relativement élevé et même supérieur aux valeurs observées avant la chute. L'utilisation du terme « acidose » est donc discutable pour ces épisodes, dans la mesure où le pH ruminal n'est inférieur à 6,0 que pendant environ une journée, voire moins, et que le pH moyen sur la période modélisée est supérieur aux seuils considérés dans la littérature comme représentatifs d'une acidose. En revanche, les paramètres zootechniques, en particulier l'ingestion, sont perturbés pendant plusieurs jours suite à la chute de pH. Le terme « off-feed » utilisé par les anglophones semble donc bien plus pertinent que celui d'« acidose » pour décrire ce que nous avons observé. Pourtant, dans la mesure où il a été montré par la modélisation (chapitre 3.1) que ces périodes d'« off-feed » sont induites par une chute de pH, nous avons considéré qu'il s'agissait de crises induites par de l'acidose, et que cela représentait les phénomènes d'acidose qui sont réellement observés dans les élevages.

Notre étude montre que les épisodes d'acidose spontanés sont très différents des épisodes d'acidose induits artificiellement, ce qui remet donc en cause une partie de la littérature citée ci-dessus, qui décrit des chutes de pH importantes et très longues, mettant généralement plus de 100 h pour retrouver des valeurs supérieures ou égales à celles avant l'induction (Patra *et al.*, 1996 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999 ; Brown *et al.*, 2000). Cependant, notre étude montre qu'une chute de pH, même très ponctuelle, peut avoir des conséquences très importantes sur l'organisme, et les mécanismes mis en jeu ne sont probablement pas les mêmes que ceux décrits suite à des acidoses induites. Ceci illustre, par ailleurs, pourquoi ces épisodes d'acidose sub-clinique sont difficilement détectables en élevage.

2.3. Modélisation des épisodes spontanés d'acidose

Des modèles mécanistes des fermentations ruminales (Lescoat *et al.*, 1996), de l'ingestion (Mertens, 1996), ou des deux simultanément (Sauvant *et al.*, 1996) ont été publiés dans la littérature, mais aucun d'entre eux ne s'est focalisé sur la modélisation des crises d'acidose.

Les mesures quotidiennes de pH, d'ingestion et de production laitière ont permis de modéliser l'évolution dynamique de ces trois paramètres pendant les 20 jours qui ont suivi le

début des crises d'acidose. Le modèle présenté au chapitre 3.1 s'appuie sur l'observation des perturbations successives du pH, de l'ingestion et de la production laitière au cours de ces crises. Le bon ajustement des données, d'une part, montre la pertinence du modèle et, d'autre part, valide l'hypothèse que les phénomènes biologiques impliqués peuvent être modélisés de manière relativement simple. Les valeurs relativement élevées de pH, pendant les jours suivant le début de l'acidose, sont obtenues par la modélisation d'un indice de mastication qui augmente lorsque les quantités ingérées diminuent, tel que cela a été décrit aux chapitres 3.1 et 5.1. L'utilisation de ce seul paramètre supplémentaire dans le modèle, permet de modéliser la cinétique de pH de manière satisfaisante, ce qui confirme que cette augmentation de l'indice de mastication représente certainement la principale cause de ce rebond de pH. Il est cependant surprenant que ce rebond de pH, suite à la chute, n'ait jamais été décrit précisément dans la littérature. Il a été mis en évidence chez un bovin en croissance (Schwartzkopf-Genswein *et al.*, 2003) et deux moutons (Kezar et Church, 1979), mais les auteurs respectifs de ces travaux ne l'ont pas souligné, et aucune interprétation n'a donc été donnée.

Le modèle présenté au chapitre 3.1 reste cependant très empirique, en particulier car de nombreux paramètres, non mesurés quotidiennement, n'ont pas pu être inclus dans le modèle. Même s'il ne permet pas de décrire les phénomènes physiologiques associés aux crises d'acidose, il permet de décrire relativement précisément la succession des perturbations, et les conséquences des épisodes d'acidose sur les paramètres représentés. En conclusion, ce travail a montré qu'il était possible de modéliser l'acidose de manière relativement simple, et ce modèle constitue une première étape vers la réalisation d'un modèle plus mécaniste, qui pourrait être intégré aux modèles de digestion ruminale déjà existants, par exemple celui de Sauvant *et al.* (1996).

2.4. Conséquences à court terme des crises et régulations associées

La modélisation de crises d'acidose a montré que les principales conséquences de l'acidose étaient observées dans les trois à quatre jours suivant la chute initiale du pH ruminal.

2.4.1. Paramètres zootechniques

2.4.1.1. Ingestion

La première régulation mise en jeu suite au déclenchement d'un épisode d'acidose est la chute d'ingestion, qui apparaît moins de 24 h après la chute de pH et atteint un maximum environ deux jours après le minimum de pH (chapitre 3.1). Ceci permet de limiter très rapidement l'apport de glucides fermentescibles dans le rumen, et donc d'éviter une chute accrue du pH ruminal.

L'ampleur de la chute d'ingestion peut ainsi être très importante. Par exemple, la modélisation réalisée sur le groupe 3 (intensité maximale de crise, chapitre 3.1) montre que l'ingestion moyenne modélisée atteint un minimum de 10 g MSI / kg PV et par jour, tandis que la moyenne des valeurs mesurées est inférieure à 5 g MSI / kg PV et par jour. De plus, l'analyse de l'effet de l'acidose sur la MSI quotidienne (chapitre 4.1) a donné un coefficient de - 6,7 g de MSI / kg PV par point de codage « ingestion ». Ce codage allant jusqu'à 6, la chute d'ingestion maximale due à l'acidose a été estimée à 40 g MSI / kg PV, ce qui correspond aux quantités moyennes ingérées quotidiennement au cours de l'expérience. Ceci confirme que les chutes d'ingestion dues à l'acidose peuvent être très importantes, et conduire à une certaine forme d'anorexie. Cette chute d'ingestion ou « off-feed » a été très souvent observée après induction brutale d'acidose aiguë, même s'il est souvent précisé que son ampleur est variable selon les individus (Kezar et Church, 1979 ; Krehbiel *et al.*, 1995a ; Patra *et al.*, 1996 ; Mohamed Nour *et al.*, 1999). En revanche, aucune diminution de la matière sèche ingérée n'a été observée dans les expériences induisant des acidoses sub-cliniques chez des vaches laitières (Keunen *et al.*, 2002 ; Krause et Oetzel, 2005). Les crises les plus importantes observées pendant notre étude pourraient donc être assimilées à des épisodes ponctuels d'acidose aiguë.

La chute d'ingestion semble principalement être due à la chute du pH ruminal, car il a été montré que la MSI diminue de manière importante lorsque le pH ruminal atteint 5,5 (Fulton *et al.*, 1979 ; Oetzel, 2003b). Cependant, de nombreux paramètres ruminiaux sont impliqués dans la régulation de l'ingestion, comme par exemple, une diminution de la fréquence et de l'amplitude des contractions ruminales entraînant une augmentation de l'encombrement du rumen (Braun *et al.*, 1992 ; Oetzel, 2000), une augmentation de la concentration en acide lactique (Buéno, 1975), en propionate (Allen, 2000), ou en acides gras volatils (Forbes, 2007), une augmentation de la pression osmotique ruminale (Oetzel, 2003b ; Martin *et al.*, 2006),

une inflammation de la paroi ruminale (Oetzel, 2003b) ou une déshydratation (Krause et Oetzel, 2006). Cependant, c'est la somme de toutes ces informations, intégrées au niveau du cerveau, qui entraîne une modification de la matière sèche ingérée.

2.4.1.2. Production laitière

Le principal signe d'acidose, pour les animaux qui ne sont pas nourris individuellement et dont le pH ruminal n'est pas mesuré, est la chute de production laitière. Ainsi, le minimum de production laitière modélisé (chapitre 3.1) a été d'environ 20 g par kg de PV pour le groupe 3 (intensité de crise la plus importante), c'est-à-dire environ 1,3 kg de lait pour une chèvre moyenne de 65 kg, soit plus de deux fois moins que le potentiel des animaux. L'analyse de l'effet de l'acidose sur la production laitière quotidienne (chapitre 4.1) a donné un coefficient de - 0,71 kg de lait par jour et par point de codage « production laitière ». Ce codage allant jusqu'à 5, les chutes maximales de production sont d'environ 3,5 kg de lait, ce qui correspond à la production moyenne des chèvres au cours de l'expérience. Une crise importante d'acidose peut donc réduire très fortement la production laitière. Krause et Oetzel (2005) ont observé une chute moyenne de 3,5 kg de lait par jour et par vache suite à l'induction d'une acidose sub-clinique, sans diminution des quantités ingérées. En revanche, Keunen *et al.* (2002) n'ont observé aucune influence de l'induction d'une acidose sub-clinique sur la production laitière ou l'ingestion des vaches, bien qu'aucune analyse individuelle n'ait été présentée. Ceci suggère, soit que l'acidose induite dans l'expérience de Keunen *et al.* (2002) n'était pas suffisante pour induire une chute de production, ce qui semble pouvoir être assimilé aux crises d'acidose du groupe 1 de notre étude (chapitre 3.1) qui présente une chute de production très faible, soit que les chutes de productions n'ont eu lieu que chez certains animaux, et qu'une analyse moyenne n'a pas permis de les mettre en évidence.

Le temps de latence observé entre la chute d'ingestion et la chute de production, modélisé par l'ajout d'un délai supplémentaire aux délais inhérents à la structure compartimentée du modèle (chapitre 3.1), semble principalement découler d'un mécanisme d'homéostasie dû au manque de nutriments disponibles dans l'organisme, et entraînant l'utilisation transitoire des stocks d'énergie. Ceci permet de reculer d'environ une journée la chute de production laitière. Par la suite, le manque de nutriments, et plus particulièrement le manque de glucose sanguin, entraîne une diminution de la sécrétion de lactose, ce qui initie la chute de production laitière, car le volume de lait produit est essentiellement lié à la sécrétion de lactose (Rook *et al.*, 1965).

2.4.1.3. Composition du lait

La composition du lait est également influencée par les crises d'acidose : les taux butyreux et protéiques augmentent, tandis que le taux de lactose diminue (chapitre 3.1), malgré une chute de la production totale de matière grasse et protéique (chapitre 4.1). Cette augmentation des taux butyreux et protéique est contraire à ce qui est habituellement décrit dans la littérature. En effet, les expériences d'induction d'acidose sub-clinique n'ont pas influencé la composition moyenne du lait des vaches utilisées (Keunen *et al.*, 2002 ; Krause et Oetzel, 2005), tandis que les revues sur l'acidose décrivent généralement une baisse du taux butyreux du lait (Bouisset, 1998 ; Oetzel, 2000 ; Brugère, 2003 ; Kleen *et al.*, 2003 ; Sauvant *et al.*, 2004 ; Martin *et al.*, 2006).

La chute du volume de lait produit entraîne une concentration de la matière grasse et des protéines du lait, et donc une augmentation des taux butyreux et protéiques (chapitres 3.1 et 4.1). Ce phénomène de concentration du lait, lorsque les quantités ingérées sont diminuées, est, d'ailleurs, décrit depuis très longtemps (Ragsdale et Turner, 1923). Le manque de nutriments disponibles entraîne également une mobilisation des réserves corporelles, ce qui est confirmé par l'augmentation de la concentration plasmatique en AGNE. Cette mobilisation des réserves corporelles participe à l'augmentation du taux butyreux pendant les épisodes d'acidose, et explique surtout la différence de pente observée entre l'augmentation du taux butyreux et celle du taux protéique lorsque l'ingestion diminue (chapitre 3.1).

Tous les paramètres zootechniques, excepté le poids vif (analysé au chapitre 4.1), sont donc influencés de manière très importante par les crises d'acidose, mais les conséquences sur le poids vif ne sont certainement visibles qu'à long terme.

2.4.2. *Fermentations ruminales et métabolites sanguins*

L'influence des crises d'acidose sur les paramètres ruminiaux et sanguins n'a pas pu être mise en évidence lors de l'analyse de l'effet du régime ou des levures (chapitre 4.2), car uniquement deux animaux étaient considérés comme en crise d'acidose pendant les jours de prélèvements.

En revanche, l'utilisation des paramètres ruminiaux et sanguins disponibles pendant les vingt jours suivant le début d'un épisode d'acidose, dans le cadre de la modélisation (chapitre 3.1), a permis de corrélérer l'évolution de ces paramètres avec celle de la MSI. Cette analyse a montré, pour les paramètres ruminiaux, que les valeurs faibles de MSI étaient corrélées à des

valeurs faibles de concentration en AGV, mais à des valeurs fortes du rapport acétate sur propionate, ce qui montre un ralentissement des fermentations ruminales.

Au niveau sanguin, les valeurs faibles de MSI étaient associées à des valeurs faibles de pH sanguin, du bilan électrolytique et des bicarbonates, mais à des valeurs élevées d'AGNE, ce qui confirme la mobilisation des réserves corporelles déjà évoquée. Cela met également en évidence une mobilisation des réserves de bicarbonates sanguins. Les conséquences d'une crise d'acidose ne concernent donc pas uniquement les paramètres zootechniques, mais l'organisme dans son ensemble.

2.4.3. *Comportement*

Comme cela a déjà été évoqué, la chute d'ingestion est accompagnée d'une augmentation de l'indice de mastication. L'analyse simultanée de l'influence du régime ou de la supplémentation en levures et de l'acidose (chapitre 5.1) a montré que cette diminution de l'indice de mastication était essentiellement due à une modification du temps d'ingestion par gramme de matière sèche ingérée. En effet, les crises d'acidose ont entraîné une diminution des quantités ingérées sans modification du temps total d'ingestion quotidien. En revanche, la durée de rumination a diminué avec les quantités ingérées (plus d'une heure de rumination en moins en moyenne) pendant les crises d'acidose (chapitre 5.1), et la durée de rumination par gramme de MSI n'a pas été influencée par l'acidose (chapitre 5.1). C'est donc l'absence de diminution de la durée totale d'ingestion qui est seule responsable de l'augmentation de l'indice de mastication, lui-même responsable du rebond de pH à des valeurs supérieures à 6,5.

Simultanément à la diminution de la quantité de matière sèche ingérée et à l'augmentation de la quantité de substances tampons apportées dans le rumen du fait de l'augmentation de l'indice de mastication, les crises d'acidose entraînent une modification de l'organisation des activités d'ingestion et de rumination au cours du temps. L'acidose a, en effet, été associée à une diminution du nombre de repas et de la vitesse d'ingestion pendant ces repas (chapitre 5.1). Plus précisément, la durée du repas principal suivant la distribution de l'après midi est diminuée, tandis que la latence entre ce repas et le premier repas secondaire est augmentée. L'analyse des cinétiques d'ingestion par la méthode de segmentation / classification (chapitre 5.2) a montré un nombre de segments plus élevé, et une moyenne de toutes les pentes plus faible pendant les épisodes d'acidose. Les animaux en acidose semblent donc déstructurer leur comportement d'ingestion pour réaliser moins de repas, mais de nombreuses petites périodes d'ingestion (non assimilables à des repas *sensu stricto*) séparées

par des périodes sans ingestion. Ceci permettrait de mieux répartir l'apport de glucides fermentescibles dans le rumen au cours du temps, et donc de limiter une nouvelle chute de pH ruminal. Cette modification de l'activité d'ingestion au cours du nyctémère a déjà été mise en évidence sur des animaux recevant des régimes riches en concentré (Abijaoudé *et al.*, 2000a), mais la notion d'acidose n'avait pas été évoquée dans ce travail et il est donc impossible de déterminer si la modification du comportement alimentaire observée par Abijaoudé *et al.* (2000a) était due à l'augmentation du pourcentage de concentré ou à des crises d'acidose induites par ce fort pourcentage de concentré.

L'analyse du budget-temps a montré que la diminution de la rumination, pendant les épisodes d'acidose, était principalement due à une diminution de la durée de rumination nocturne, alors que la littérature montre que la phase majeure de rumination a principalement lieu la nuit et qu'elle est présente chez tous les ruminants (Focant, 1984 ; Beauchemin *et al.*, 1990 ; Deswysen *et al.*, 1993 ; Fischer *et al.*, 2002). Ces résultats sont contraires à ceux présentés au chapitre 2.1, montrant une diminution de la rumination diurne lorsque le pourcentage de concentré augmente, mais les épisodes d'acidose n'avaient pas été identifiés pendant cette expérience.

L'analyse simultanée des cinétiques d'ingestion et de rumination (chapitre 3.2) confirme la déstructuration des activités d'ingestion et de rumination, en particulier du fait de la diminution de la phase majeure de rumination nocturne. Pendant les crises d'acidose, les animaux diminuent le nombre de périodes individualisées et principalement dédiées à l'une de ces deux activités, pour ingérer et ruminer alternativement tout au long de la journée.

La diminution du temps passé à ruminer pendant les épisodes d'acidose se fait préférentiellement au profit du temps de repos, défini par l'inactivité de l'animal dans notre étude. De plus, le temps passé en position « recroquevillée » (curled up, chapitre 5.1) a également été augmenté pendant les crises d'acidose, ce qui peut être un signe de mal-être ou d'inconfort, car des animaux sains sont rarement observés dans cette position pendant la journée, lorsque qu'il y a de l'activité dans la chevrerie. De plus, le temps passé dans cette position est plus particulièrement augmenté pendant les intervalles incluant les distributions de nourriture, ce qui semble confirmer l'aversion pour le régime et une certaine forme d'anorexie.

2.5. Conséquences à moyen et long terme, enjeux et conséquences analytiques

2.5.1. Des crises à la limite entre physiologie et pathologie ?

La modélisation des crises d'acidose (chapitre 3.1) a montré que les valeurs initiales d'ingestion et de production pouvaient ne pas être retrouvées avant une vingtaine de jours pour les crises les plus importantes, ce qui signifie que les conséquences ne sont pas uniquement ponctuelles et qu'elles peuvent entraîner des pertes financières considérables pour les éleveurs. La modélisation des épisodes d'acidose a également montré que le bilan énergétique cumulé diminuait pendant plusieurs jours, et restait négatif pendant les vingt jours modélisés, ce qui a été confirmé par l'influence négative des crises d'acidose sur le bilan énergétique (-0,4 à -0,5 UFL, chapitre 4.1). Ceci met en évidence une relative inefficacité des mécanismes d'homéostasie habituellement mis en jeu lorsque le bilan énergétique diminue, car cette chute du bilan énergétique n'est pas suivie d'une augmentation de l'ingestion. La principale cause de cette absence d'augmentation de l'ingestion semble être l'aversion pour le régime déjà évoquée. Ce bilan énergétique cumulé, qui reste négatif pendant plus de vingt jours, ne peut pas être sans influence sur la santé et la production future de l'animal.

Tout ceci montre que les phénomènes mis en jeu pendant les épisodes d'acidose sont à la limite entre régulations physiologiques et pathologie, et met en évidence le rôle très important des mécanismes d'homéostasie dans la survie de l'animal (Sauvant, 1994). En effet, la mort de l'animal peut survenir lorsque la chute d'ingestion n'apparaît pas suffisamment vite pour limiter les fermentations ruminales, principalement en raison des nombreux délais observés. Ce phénomène est certainement impliqué dans les cas d'acidose aiguë entraînant ruminite (Brugère, 2003 ; Oetzel, 2003b ; Krause et Oetzel, 2006) diarrhée, déshydratation, (Elam, 1976 ; Huber, 1976), puis des conséquences d'ordre locomoteur (fourbures) ou infectieux à tous les niveaux de l'organisme (Krehbiel *et al.*, 1995a ; Bouisset, 1998 ; Krause *et al.*, 2002 ; Kleen *et al.*, 2003 ; Oetzel, 2003b) pouvant conduire, relativement rapidement, à la mort de l'animal.

La mort de l'animal peut également survenir lorsque l'aversion pour le régime demeure plus importante que la faim pendant trop longtemps, et le seuil létal dépend, très certainement, de l'importance des réserves corporelles de l'animal. Uhart et Carroll (1967) ont ainsi observé, lors d'une transition très rapide d'un régime à base de foin à un régime à 90 % de concentré, que la période d'anorexie pouvait durer entre deux et six jours selon les animaux. De même, Kezar et Church (1979) ont observé, après induction d'acidose par injection intra ruminale de

glucose (15 g / kg PV), que les moutons mettaient de 48 à 96 h avant de se remettre à ingérer des quantités similaires à celles précédant l'induction. Pour ces deux expériences, les animaux se sont néanmoins, spontanément remis à manger et les mécanismes d'homéostasie ont donc été suffisants pour ne pas entraîner la mort de l'animal.

2.5.2. Conséquences à long terme des crises : mémoire ?

L'étude plus précise des animaux présentant plusieurs épisodes d'acidose successifs (chapitre 3.1) a montré que le deuxième épisode était généralement moins important que le premier. Ceci semble montrer une certaine mémoire des crises qui permettrait de diminuer l'ampleur de la crise suivante. Il a cependant été impossible de déterminer par quel mécanisme l'ampleur de la seconde crise était diminuée, et s'il s'agissait d'une action consciente de l'animal ou d'un mécanisme de régulation physiologique.

Une expérience a été réalisée en 2005 (Annexe 4), dans le cadre de cette thèse, avec les animaux qui avaient déjà été utilisés pour l'expérience réalisée en 2004 (chapitre 2.1). Les huit animaux utilisés ont reçu un régime acidogène similaire à celui utilisé pour l'expérience principalement présentée dans ce travail (chapitres 3, 4, 5 et 6) à partir d'un mois avant la date de mise-bas théorique. La moitié des animaux a été supplémentée en levures à partir de cette même date. Les chèvres sont restées en lots jusqu'à la mise-bas puis ont été placées en cases individuelles à partir d'une semaine après la mise-bas. Cette expérience a été caractérisée par des ingestions très faibles pour la majorité des animaux, ainsi que par des productions laitières très inférieures au potentiel des animaux. Quatre animaux sur les huit utilisés ont même refusé de consommer le régime expérimental acidogène après la montée en cases individuelles (l'ingestion individuelle n'ayant pas été contrôlée avant, il est impossible de savoir à partir de quand leur ingestion avait chuté), et un régime moins riche en concentré a dû leur être distribué pendant environ trois semaines avant que les chèvres acceptent de consommer à nouveau le régime expérimental. Par la suite, deux animaux ont dû être retirés avant la fin de l'expérience, car ils refusaient de consommer le régime expérimental. Ces problèmes illustrent très certainement la mémoire que l'animal, ou l'organisme, peut avoir des épisodes d'acidose précédents. En effet, ces animaux avaient déjà expérimenté l'année précédente un régime riche en concentré, et, pour certains, présenté des épisodes d'acidose. Ceci est d'ailleurs cohérent avec les observations de Provenza (1995) montrant que les ruminants peuvent se souvenir des effets positifs ou négatifs d'un aliment pendant un à trois ans, sans y être à nouveau confrontés. De plus, la distribution précoce du régime riche en concentré a

certainement entraîné des épisodes d'acidose avant la mise-bas, même si cela n'a pas pu être déterminé, car l'ingestion individuelle n'était pas mesurée, et les chèvres étaient taries. Tout ceci semble avoir été majoritairement responsable des problèmes d'ingestion rencontrés pendant l'expérience de 2005, et illustre l'aversion à long terme pour le régime que les épisodes d'acidose peuvent avoir déclenchée. Ces résultats soulignent également le fait qu'un animal ayant subi une acidose relativement importante ne doit pas être réutilisé pour une autre expérience sur l'acidose pour ne pas biaiser les résultats.

Les chèvres utilisées dans l'expérience suivante (présentée aux chapitres 3, 4, 5 et 6) ont été choisies parmi celles n'ayant jamais participé à des expériences sur l'acidose, afin de limiter les problèmes dus à des épisodes d'acidose antérieurs importants et le régime riche en concentré ne leur a été distribué qu'après une période d'habituation aux cases individuelles et aux appareils de mesure en continu, afin de pouvoir tester la réaction des animaux lors du passage au régime riche en concentré.

2.5.3. Enjeu : prévoir les crises et leur intensité

L'étude des épisodes d'acidose a permis de déterminer les mécanismes de régulation responsables des chutes d'ingestion et de production, et ceux permettant la récupération de l'animal. En revanche, le (ou les) mécanisme(s) responsable(s) de la chute de pH ruminal initiale n'a (ont) pas pu être mis en évidence. Aucun symptôme particulier n'a été observé, pendant l'expérience, avant le début des crises d'acidose, malgré une surveillance quotidienne des animaux. Aucune modification particulière du pH moyen, de l'ingestion ou de la production n'a non plus été observée pendant les jours précédant les épisodes, ce qui est confirmé par les moyennes stables obtenues pendant les cinq jours précédant la chute initiale de pH pour tous les groupes utilisés pour ajuster notre modèle (chapitre 3.1). La plupart des expériences publiées sur l'acidose ayant été réalisée avec des épisodes d'acidose induits, aucune information n'a été trouvée sur ce point. Il semble donc impossible, dans l'état actuel des connaissances et avec les paramètres que nous avons mesurés, de prévoir le déclenchement des crises d'acidose. Ces dernières ne peuvent donc être détectées qu'à *posteriori*, soit lorsque l'ingestion chute si les quantités ingérées sont mesurées quotidiennement, c'est-à-dire un à deux jours après la chute de pH, soit lorsque la production laitière chute, c'est-à-dire deux à trois jours après la chute de pH. D'un point de vue pratique, il est alors trop tard pour éviter les conséquences à moyen et long termes de la crise, et la

seule conséquence que l'éleveur peut limiter, par la distribution de fourrage appétant, est la durée de la période d'anorexie.

Mis à part le niveau de production laitière avant le début de la crise d'acidose, qui était corrélé avec l'intensité de la crise, aucun paramètre permettant d'expliquer ou de prévoir l'intensité de la crise n'a été mis en évidence. De plus, les ordres de grandeurs similaires des paramètres du modèle obtenus pour les différents groupes (chapitre 3.1) montrent que les mécanismes impliqués dans le déclenchement des épisodes et la récupération semblent similaires quelle que soit l'intensité de la crise. Certains auteurs ont pu induire des crises d'intensité variable par un apport plus ou moins important de glucose dans le rumen chez des moutons (Krehbiel *et al.*, 1995a), mais l'ampleur des crises d'acidose décrites au chapitre 3.1 ne dépendait pas de la quantité de matière sèche ingérée, et donc de la quantité de glucides entrant dans le rumen. Brown *et al* (2000) ont, en revanche, observé chez des vaches laitières que l'apport brutal de glucides dans le rumen avait des conséquences très variables selon les animaux, indépendamment de la quantité de glucides apportés. Cette grande variabilité de la réponse individuelle des animaux à une arrivée massive de glucides dans le rumen pourrait donc être une spécificité des animaux laitiers. Ceci semble être confirmé par le fait que seul le niveau de production laitière avant le début de la crise d'acidose était corrélé avec l'intensité de la crise, mais cette corrélation est à vérifier sur un nombre plus important d'animaux.

L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration a eu peu d'influence sur les paramètres mesurés, mais a induit de nombreuses crises ponctuelles d'acidose. Ces crises sont relativement différentes des acidoses aiguës ou sub-cliniques décrites dans la littérature, mais ont eu des conséquences à tous les niveaux étudiés : des paramètres zootechniques au métabolisme général, sans oublier le comportement alimentaire. Ces crises spontanées peuvent avoir des conséquences à long terme (plusieurs semaines à plusieurs années) sur la production et la santé des animaux.

Contrairement aux acidoses généralement décrites dans la littérature, ces crises spontanées représentent les phénomènes réellement présents en élevage. Les conséquences observées à court terme ont cependant lieu relativement rapidement suite à la chute de pH initiale (quelques jours) et ces épisodes peuvent passer inaperçus s'il n'y a pas de suivi individuel de l'ingestion et de la production, ce qui est difficilement envisageable.

Cependant, si les conséquences des acidoses ont été relativement bien décrites, ce travail n'a pas permis de déterminer de mécanisme déclencheur des crises, ni de paramètre(s) permettant de prévoir le déclenchement, l'ampleur et la durée des crises. Or, d'un point de vue pratique, c'est une question essentielle pour les éleveurs.

3. APPORT DE LEVURES VIVANTES

3.1. Des résultats variables dans la littérature

3.1.1. Illustration de la très grande variabilité des résultats publiés

De nombreux travaux concernant l'apport de levures à des ruminants ont été publiés. Uniquement, les données relatives à l'utilisation de *Saccharomyces cerevisiae*, seront présentées. Les résultats sont très variables selon les expériences, pour les paramètres zootechniques comme physiologiques. Ainsi, certaines publications ont montré un effet positif de la supplémentation en levures sur l'ingestion (Williams *et al.*, 1991 ; Erasmus *et al.*, 1992 ; Mutsvangwa *et al.*, 1992 ; Mir et Mir, 1994 ; Putnam *et al.*, 1997 ; Abd El-Ghani, 2004 ; Lesmeister *et al.*, 2004), tandis que d'autres ne montrent aucun effet de l'apport de levures sur l'ingestion (Erdman et Sharma, 1989 ; Arambel et Kent, 1990 ; Bernard, 1992 ; Piva *et al.*, 1993 ; Swartz *et al.*, 1994 ; Chiquette, 1995 ; Giger-Reverdin *et al.*, 1996 ; Yoon et Stern, 1996 ; Hadjipanayiotou *et al.*, 1997 ; Kung *et al.*, 1997 ; Robinson, 1997 ; Wohlt *et al.*, 1998 ; Soder et Holden, 1999 ; Beauchemin *et al.*, 2003 ; Baumann *et al.*, 2004). De même, certaines publications ne montrent aucun effet de la supplémentation sur la production laitière ou la composition du lait (Quinonez *et al.*, 1988 ; Erdman et Sharma, 1989 ; Arambel et Kent, 1990 ; Bernard, 1992 ; Higginbotham *et al.*, 1994 ; Swartz *et al.*, 1994 ; Chiquette, 1995 ; Hadjipanayiotou *et al.*, 1997 ; Kung *et al.*, 1997 ; Robinson, 1997 ; Wohlt *et al.*, 1998 ; Soder et Holden, 1999 ; Wang *et al.*, 2001), tandis que d'autres montrent une augmentation de la production laitière sans modification de la composition du lait (Wohlt *et al.*, 1991 ; Erasmus *et al.*, 1992 ; Abd El-Ghani, 2004), ou une augmentation de la production laitière et une augmentation de la matière grasse ou de la matière protéique du lait (Watkins, 1993 ; Putnam *et al.*, 1997).

L'influence des levures sur les paramètres physiologiques est également très variée et seuls, quelques paramètres sont évoqués à titre d'exemple. Ainsi, certaines publications ne montrent aucun effet de l'addition de levures sur la concentration totale en AGV du rumen (Quinonez *et al.*, 1988 ; Piva *et al.*, 1993 ; Doreau et Jouany, 1998 ; Robinson et Garrett, 1999), alors que d'autres ont montré un effet soit négatif (Williams *et al.*, 1991), soit positif (Mutsvangwa *et al.*, 1992 ; Roa *et al.*, 1997). De même, certaines publications ne montrent aucune influence des levures sur les paramètres plasmatiques (Wohlt *et al.*, 1991 ; Piva *et al.*, 1993 ; Beauchemin *et al.*, 2003 ; Lesmeister *et al.*, 2004), tandis que d'autres montrent une augmentation du BHB (Quigley *et al.*, 1992), des AGNE et du BHB (Giger-Reverdin *et al.*, 1996), une diminution de la glycémie (Giger-Reverdin *et al.*, 1996) ou une augmentation de la glycémie (Piva *et al.*, 1993). L'influence des levures sur le pH ruminal est également variable. Certaines publications ne montrent aucun effet des levures sur le pH ruminal (Wiedmeier *et al.*, 1987 ; Quinonez *et al.*, 1988 ; Higginbotham *et al.*, 1994 ; Newbold *et al.*, 1995 ; Mathieu *et al.*, 1996a ; Yoon et Stern, 1996 ; Putnam *et al.*, 1997 ; Doreau et Jouany, 1998 ; Robinson et Garrett, 1999 ; Baumann *et al.*, 2004), d'autres une influence positive des levures, mais souvent ponctuelle, uniquement à certains temps de prélèvement (Mutsvangwa *et al.*, 1992 ; Roa *et al.*, 1997 ; Abd El-Ghani, 2004).

Les résultats sont donc extrêmement variables dans la littérature, même si les résultats non significatifs ou négatifs peuvent avoir été moins publiés que les résultats positifs. Quelques analyses quantitatives de la littérature ont étudié les effets de la supplémentation en levures sur la production laitière (Ali-Haimoud-Lekhal *et al.*, 1999), les fermentations ruminales (Lescoat *et al.*, 2000), ou les deux simultanément (Robinson, 2002 ; Sauvant *et al.*, 2004) mais les résultats sont également variables. Ali-Haimoud-Lekhal *et al.* (1999) ont mis en évidence un effet positif des levures sur la production laitière, mais uniquement en début de lactation. La revue quantitative de Robinson (2002) a mis en évidence une influence positive des levures sur le pH ruminal et la concentration en AGV, et négative sur la concentration en acide lactique, tandis que celles de Lescoat *et al.* (2000) et Sauvant *et al.* (2004) n'ont pas permis de mettre en évidence d'effets des levures sur les paramètres ruminiaux. En revanche, la méta-analyse présentée chapitre 1.7 et réalisée sur 110 publications a montré un effet positif des levures sur l'ingestion, la production laitière, la digestibilité de la matière organique, le pH ruminal et la concentration ruminale en AGV, ainsi qu'un effet négatif de la supplémentation en levures sur la concentration ruminale en acide lactique. Les levures semblent donc avoir, d'une manière générale, un effet positif sur les fermentations ruminales, mais la très grande variabilité de réponse observée rend les interprétations difficiles.

3.1.2. Différentes souches de levures et association avec d'autres additifs

Même si la méta-analyse réalisée (chapitre 1.7) et les références bibliographiques citées ci-dessus ne concernent que l'apport de *Saccharomyces cerevisiae*, de nombreux auteurs ont utilisé cette levure en association avec d'autres micro-organismes tels que *Aspergillus oryzae* (Wiedmeier *et al.*, 1987 ; Oellermann *et al.*, 1990 ; Higginbotham *et al.*, 1994 ; Chiquette, 1995 ; Mathieu *et al.*, 1996b ; Miranda *et al.*, 1996 ; Yoon et Stern, 1996 ; Jouany *et al.*, 1998a ; 1998b ; Ali-Haimoud-Lekhal *et al.*, 1999 ; Jouany *et al.*, 1999), en association avec des enzymes (Kung *et al.*, 1997 ; De Queiroz *et al.*, 2004) ou du monensin (Adams *et al.*, 1981 ; Karr *et al.*, 1991a ; 1991b ; Arakaki *et al.*, 2000 ; Garcia *et al.*, 2000). Cette liste n'est, bien entendu, pas exhaustive. La souche de *Saccharomyces cerevisiae* peut également varier selon les expériences et n'est, de plus, pas toujours précisée dans les publications alors que Newbold *et al.* (1995) ont montré que des souches différentes peuvent avoir une influence différente sur la population microbienne ruminale. Corona *et al.* (1999) ont également montré que les effets d'une supplémentation en levures sur les paramètres fermentaires ruminiaux pouvaient varier légèrement entre deux souches commerciales différentes de *Saccharomyces cerevisiae*. Le mode de conservation des levures, par exemple sous forme liquide ou déshydratée, pourrait également modifier leur activité dans le rumen et donc leur influence. Tout ceci peut participer à la très forte variabilité observée entre les expériences.

3.1.3. Influence des facteurs expérimentaux

Wang *et al.* (2001) ont montré que l'effet d'une supplémentation en levures sur l'ingestion et la production de vaches laitières était plus important pour une proportion de NDF de fourrage dans la ration de 21 % par rapport à une proportion de NDF de fourrage de 17 %. Williams *et al.* (1991) ont observé que l'influence positive des levures sur le taux butyreux du lait était supérieure pour les régimes ayant un faible rapport fourrage/concentré et Watkins (1993) a observé que l'influence des levures sur les performances des vaches laitières était quasiment inexistante pour des régimes à faibles concentrations en glucides de réserve, mais augmentait lorsque cette concentration atteignait 30 à 38 %. Les résultats dépendent donc souvent du régime utilisé. L'analyse de facteurs interférents présentée dans la méta-analyse (chapitre 1.7) a confirmé que de nombreux facteurs peuvent modifier l'influence des levures sur les paramètres testés. Pour la plupart des paramètres zootechniques et physiologiques, l'influence des levures était supérieure pour les animaux à haut niveau d'ingestion et pour des régimes riches en concentré et pauvres en NDF, ce qui est logique dans la mesure où

l'augmentation du pourcentage de concentré est liée à une diminution de la proportion de fourrages, donc de NDF. En revanche, les régressions montrent, par exemple, que l'influence des levures sur le pH ruminal est positive pour les régimes pauvres en NDF, mais négative à partir de 80 % de NDF. De même, l'influence des levures sur la digestibilité de la matière organique est positive pour des régimes comprenant moins de 67 % de concentré, mais négative pour des régimes comprenant plus de 67 % de concentré. L'effet positif des levures sur certains paramètres, comme les AGV ou la production laitière, peut également être simultanément augmenté pour les régimes riches en concentré et riches en NDF, ce qui signifie que l'influence des levures est minimale pour les régimes de composition moyenne, ni très concentrés, ni très riches en fibres.

Tout ceci montre que, même si la méta-analyse a permis de mettre en évidence des effets globalement positifs des levures sur les fermentations ruminales, ces effets sont très variables selon les conditions expérimentales et peuvent même être inversés pour certains régimes à forts pourcentages de concentré ou de NDF. Ceci explique certainement également une partie de la très grande variabilité observée dans la littérature, et montre que la distribution de levures doit être adaptée aux conditions particulières de chaque élevage et de chaque troupeau.

Seuls, les paramètres expérimentaux liés au niveau d'ingestion et à la composition du régime ont été présentés, mais de nombreux autres facteurs, tels que le stade physiologique (Chiquette, 1995 ; Kung *et al.*, 1997 ; Ali-Haimoud-Lekhal *et al.*, 1999 ; Dann *et al.*, 2000), ont été évoqués dans la littérature et peuvent également modifier l'influence des levures sur les paramètres zootechniques ou ruminiaux.

3.2. Un effet inférieur à celui des crises d'acidose

L'analyse simultanée de l'influence de la supplémentation en levures et de l'acidose (chapitres 4 et 5) sur les paramètres zootechniques, physiologiques et comportementaux a montré que l'influence des crises d'acidose était supérieure à celle de la supplémentation en levures pour la majorité des paramètres analysés. Ceci peut également expliquer une partie de la très grande variabilité des résultats publiés, car aucune des publications citées ne prenait en compte ce phénomène lorsque la supplémentation était effectuée chez des animaux recevant un régime riche en concentré. Pourtant, l'analyse de l'influence des levures sans prendre en compte les épisodes d'acidose donne des résultats différents de l'analyse prenant l'acidose en

covariable. L'analyse simultanée des deux facteurs (acidose et levures) a montré que les effets observés dans une analyse qui ne tenait pas compte de l'acidose étaient, en réalité, imputables aux épisodes d'acidose, et non aux levures. L'analyse simultanée des deux facteurs a donc permis d'éviter, ou au moins de limiter, la confusion d'effets entre supplémentation en levures et épisodes d'acidose.

Ceci souligne également le fait que, dans notre expérience, les effets des levures n'étaient pas très importants, et qu'une analyse rapide n'aurait pas pu les mettre en évidence. Il est donc absolument nécessaire de prendre en compte, dans les analyses, le maximum de facteurs expérimentaux pouvant influencer les paramètres testés de manière plus importante que la supplémentation en levures.

3.3. Un effet par l'intermédiaire du comportement alimentaire ?

L'apport de levures a eu relativement peu d'effet sur les paramètres zootechniques et physiologiques, mises à part l'augmentation de la production laitière et la diminution des taux butyreux et protéiques par un phénomène de dilution inverse au phénomène de concentration décrit pour les crises d'acidose. Mis à part la publication de Bach *et al.* (2007), aucune étude analysant l'influence de la supplémentation en levures sur le comportement alimentaire n'a été trouvée. Pourtant, notre étude a montré que la supplémentation en levures semblait pouvoir modifier le comportement alimentaire des animaux. Plus précisément, les animaux supplémentés ont plus trié leur ration que les animaux non supplémentés, et ont, de ce fait, ingéré une ration moins fibreuse que celle distribuée ou que celle ingérée par les témoins. Cette différence de comportement est relativement difficile à expliquer au vu du peu de données disponibles dans la littérature. En revanche, cela peut expliquer pourquoi le pH ruminal a eu tendance à être inférieur pour les animaux supplémentés par rapport aux témoins. De plus, les animaux supplémentés ont présenté des repas principaux plus longs et plus importants après la distribution de l'après midi que les témoins (chapitre 5.1), ce qui est confirmé par l'analyse des cinétiques d'ingestion par segmentation / classification (chapitre 5.2). Ces résultats n'ayant jamais été décrits dans la littérature, et ayant été obtenus sur un nombre relativement faible d'individus, d'autres études sont nécessaires pour les confirmer et les compléter. Cependant, cela montre que l'apport de levures dans le rumen peut influencer le comportement alimentaire, et que ces modifications du comportement alimentaire peuvent expliquer, du moins en partie, les effets observés sur d'autres paramètres. Une analyse de

l'influence des levures sans prendre en compte le comportement de tri aurait montré que les levures avaient tendance à accentuer la chute de pH ruminal, alors que cette analyse plus complète semble, au contraire, montrer que les animaux supplémentés choisissent de manger un régime moins fibreux et/ou pourraient supporter un régime moins fibreux sans influence majeure sur le pH ou d'autres paramètres ruminiaux. Ceci souligne, encore une fois, l'importance de prendre en compte le maximum de facteurs dans les analyses.

3.4. Latence et rémanence

L'analyse des effets rémanents d'une supplémentation en levures a également été peu décrite dans la littérature. Pourtant, ce travail a montré que l'effet rémanent de l'apport de levures (chapitre 4.1 et 2 et chapitre 5.1) pouvait être plus important que l'effet de la supplémentation elle-même, ou était du moins détecté sur un nombre plus important de paramètres, en particulier pour les paramètres sanguins. Ainsi, la production laitière corrigée est augmentée après l'arrêt de la supplémentation, alors que seule la production laitière brute était accrue pendant la période de supplémentation. Ces résultats sont relativement surprenants dans la mesure où il a été montré, dans cette même expérience (chapitre 6.1), que la présence de levures dans le rumen ou dans l'appareil digestif n'était plus détectable dès le troisième jour après l'arrêt de la supplémentation. Cet effet n'est donc pas dû à une survie des levures dans le rumen ou le tractus digestif des animaux. De même, la biodiversité de l'écosystème ruminal a eu tendance à être plus importante pendant la dernière semaine de supplémentation (chapitre 6.3), alors que cet effet n'était pas détectable après trois semaines de supplémentation et n'était plus décelable après l'arrêt de la supplémentation. Ces résultats suggèrent qu'il existe très certainement un temps de latence entre le début de la supplémentation et l'apparition des premières différences significatives entre animaux supplémentés et animaux témoins. Ce temps de latence provient probablement du temps d'adaptation de l'écosystème ruminal à l'apport de levures. En effet, il a été montré que l'adaptation de la muqueuse ruminale à un régime riche en concentré prenait entre quatre et six semaines, tandis que celle des micro-organismes nécessitait environ trois semaines (Kleen *et al.*, 2003). Il aurait donc certainement été intéressant de diviser la période expérimentale de supplémentation en plusieurs sous-périodes pour l'analyse afin de confirmer, ou non, cette hypothèse, et éventuellement de déterminer le temps de latence avant l'apparition des différences.

Ce temps de latence paraît, néanmoins, être différent selon les paramètres, ce qui souligne les nombreux délais existants dans l'organisme entre une modification des paramètres ruminiaux, ici par l'apport de levures, et les conséquences comportementales, physiologiques, et métaboliques qui en découlent. D'une manière surprenante, ce sont le comportement de tri, et la production laitière brute qui sont modifiés d'une manière très significative pendant la supplémentation, tandis que les modifications ruminales et métaboliques observées sont beaucoup moins importantes. Si cela peut être dû au nombre plus important de données recueillies pour la production laitière, ce n'est pas le cas pour le tri, dont le nombre de données est égal à celui des paramètres ruminiaux, car ces deux types de mesures ont été réalisés simultanément. De plus, ce comportement de tri n'est plus modifié après l'arrêt de la supplémentation, alors que les paramètres ruminiaux, et surtout sanguins, le sont encore, ou le deviennent. Plus précisément, les effets rémanents observés sur les paramètres sanguins semblent confirmer la capacité des animaux à tamponner les effets des modifications ruminales afin de limiter les variations au niveau sanguin (Giger-Reverdin *et al.*, 2006). En revanche, cela montre que ces paramètres sanguins semblent pouvoir être influencés sur le long terme, en particulier lorsque les modifications d'ordre ruminal, qui les ont engendrées, ne sont plus décelables.

Ces résultats ne sont que partiels dans la mesure où les prélèvements ont été réalisés toutes les trois semaines environ, et nécessitent d'être confirmés. Ils mettent néanmoins en évidence que le temps de latence entre le début de la supplémentation et les conséquences de cette supplémentation peuvent être très variables selon les paramètres. Une analyse plus précise en divisant les périodes de supplémentation et post-supplémentation en sous-périodes, ainsi que des mesures plus fréquentes pourraient permettre de compléter ces analyses, et de quantifier les latences.

Malgré des résultats très variables dans la littérature, une méta-analyse réalisée sur 110 publications a montré un effet globalement positif de l'apport de *Saccharomyces cerevisiae* sur les fermentations ruminales et la production des ruminants. Cependant, de nombreux facteurs, en particulier le régime, peuvent modifier l'influence des levures sur les fermentations ruminales ou les paramètres zootechniques.

La prise en compte des épisodes d'acidose dans les analyses a permis de limiter les confusions d'effets et de montrer que l'apport de levures augmentait la production laitière et modifiait le comportement de tri des animaux, sans effets importants sur les paramètres physiologiques et métaboliques. En revanche, l'analyse montre qu'il semble exister des temps de latence variables selon les paramètres, et que cela peut induire un effet rémanent de la supplémentation pour certains d'entre eux.

4. VARIABILITE INDIVIDUELLE

4.1. Comportement alimentaire

4.1.1. Typologie du comportement alimentaire

L'analyse spécifique de la dynamique intra-jour du comportement alimentaire a permis de déterminer des types de comportements alimentaires très différents. Les deux méthodes utilisées (chapitre 3.2 et chapitre 5.2), l'une basée uniquement sur les cinétiques d'ingestion (quantités ingérées, chapitre 5.2) et l'autre basée simultanément sur les cinétiques d'ingestion et de rumination (durées, chapitre 3.2) ont globalement conduit à des résultats similaires, ce qui montre que la différence observée entre ces deux grands types de comportements représente une grande partie de la variabilité totale observée pendant cette expérience. Globalement, ces deux comportements types opposent, d'une part, les animaux qui réalisent un grand repas suite à la distribution du soir, puis une grande période de rumination nocturne, puis ingèrent à nouveau avant la distribution du matin, et d'autre part, les animaux qui réalisent un premier repas suivi d'une période de rumination, puis un deuxième repas, puis semblent ingérer et ruminer alternativement pendant de très courtes périodes au cours de la nuit, sans montrer de nouvel épisode d'ingestion avant la distribution du matin. Ces deux types de comportements seront respectivement nommés « vorace » et « grignoteur » par la suite. Il est important de préciser que ces deux comportements types ne représentent pas les deux seuls types de comportements observés. En effet, les deux méthodes ont montré la présence d'un continuum entre ces deux types de comportements. De plus, si les éléments majeurs de la diversité des comportements observés sont, d'une part, la première phase d'ingestion mono ou biphasique et, d'autre part, l'existence d'une activité de rumination

nocturne importante et croissante, ces deux éléments semblent relativement indépendants, et leur association peut conduire à quatre grands types de comportements. Pour un souci de clarté, nous ne nous focaliserons que sur les deux principaux décrits ci-dessus.

Les animaux de type « vorace » ont un comportement alimentaire très similaire à ce qui a été décrit dans la littérature pour des animaux au pâturage ou pour des animaux alimentés à volonté en stabulation (Dulphy et Faverdin, 1987), mais également pour des animaux nourris *ad libitum* avec deux distributions par jour (Abijaoudé *et al.*, 2000a). Ces auteurs décrivent, en effet, deux grands repas par jour, l'un en fin d'après midi (ce qui correspond au début de nos intervalles d'études), et l'autre, avant l'aube (donc avant la distribution du matin dans notre étude). Ces grandes périodes d'ingestion peuvent, de plus, être décrites en fonction du temps (t) écoulé depuis la distribution par un modèle exponentiel de type $MSI = K (1 - \exp^{-bt})$, dans lequel b représente une constante de rassasiement (Jarrige *et al.*, 1995). La cinétique de rumination présentée par ces animaux est également cohérente avec ce qui a déjà été décrit (Focant, 1984 ; Jarrige *et al.*, 1995), c'est-à-dire la présence d'une phase majeure de rumination nocturne.

En revanche, les animaux de type « grignoteur » ont présenté un comportement alimentaire caractérisé par deux repas relativement importants avant la nuit, que l'on peut caractériser de période d'ingestion biphasique, séparés par une période de rumination relativement intense, puis peu de rumination pendant la nuit. Cette faible rumination nocturne contredit les observations de Focant (1984) montrant que la phase de rumination nocturne était constante pour tous les ruminants. L'hypothèse de l'éclairage des animaux pour les enregistrements vidéo a été évoquée pour expliquer cette faible rumination nocturne, car la rumination semble être stimulée par l'obscurité (Focant, 1984 ; Jarrige *et al.*, 1995). Tous les animaux auraient alors dû montrer un comportement de ce type, car ils étaient éclairés par des ampoules similaires pendant la totalité de l'expérience, ce qui n'a pas été le cas. Ce comportement de type « grignoteur » semble, par contre, relativement similaire à ce qui a été observé pendant la première expérience (Chapitre 2.1) et par Abijaoudé *et al.* (2000a), chez des chèvres recevant un régime riche en concentré. Dans ces deux expériences, en effet, une augmentation à la fois du nombre de repas et de la répartition des activités d'ingestion au cours du temps a été observée lorsque le pourcentage de concentré augmentait dans la ration. La phase de rumination nocturne n'était, néanmoins, pas modifiée et restait importante dans notre expérience (Chapitre 2.1), et les comportements d'ingestion ne semblaient pas être aussi déstructurés que dans le groupe « grignoteur » décrit ci-dessus. L'échelle de temps utilisée au

chapitre 2.1 était, cependant, moins précise (intervalles de 2 h) que celle utilisée au chapitre 3.2 (intervalles de 20 min), ce qui rend la comparaison délicate.

Sachant que 31 % des 44 points « animaux-jours » utilisés pour déterminer le groupe « grignoteur » provenaient du régime peu concentré ou des transitions entre les régimes, tandis que 15 % des points du groupe « vorace » provenaient du régime peu concentré ou des transitions, on ne peut pas conclure que chaque type de comportement est associé à un régime particulier et résulterait d'une adaptation des animaux au pourcentage de concentré du régime. Enfin, même si les animaux en crise d'acidose ont été préférentiellement rencontrés dans le groupe des « grignoteurs », ce type de comportement n'est pas uniquement observé chez des animaux en acidose, et a, également été décrit dans une analyse réalisée après avoir éliminé les jours en acidose. Ce comportement ne représente donc pas, non plus, un comportement aberrant d'origine pathologique. Tout ceci indique que les deux types de comportements « grignoteur » et « vorace » ne dépendent pas des conditions expérimentales, mais sont bien deux types de comportements naturellement observés chez des chèvres laitières en cases individuelles, nourries deux fois par jour.

En revanche, certains animaux ont été préférentiellement observés dans l'un ou l'autre de ces deux groupes pendant toute la durée de l'expérience, tandis que d'autres ont modifié leur comportement alimentaire, suite à la distribution du régime riche en concentré ou aux épisodes d'acidose et sont passés d'un groupe à l'autre. Ces deux types de comportements extrêmes, ainsi que tous les comportements intermédiaires existants, semblent donc être plus dus à la variabilité individuelle du comportement alimentaire, qu'à la variabilité des facteurs expérimentaux. Cette variabilité individuelle a été relativement peu décrite dans la littérature (Dulphy *et al.*, 1990 ; Jarrige *et al.*, 1995). Dulphy *et al.* (1990) ont néanmoins observé que la variabilité individuelle pouvait être supérieure à la variabilité entre espèces. Nous avons également montré que cette variabilité individuelle était supérieure à la variabilité engendrée par les paramètres expérimentaux testés, ce qui souligne la nécessité de prendre en compte le comportement alimentaire individuel des animaux lors d'une mise en lots. Dans ce travail, la mise en lots prenait en compte le pourcentage de MSI totale quotidienne ingérée 100 minutes après la distribution du soir, ce qui représentait le temps auquel le maximum de variabilité était observé. Cette mesure permet, vraisemblablement de différencier les animaux réalisant une seule grande période d'ingestion, de ceux présentant une première période d'ingestion biphasique. Elle ne permettait pas, en revanche, de différencier les animaux qui réalisent une phase majeure de rumination nocturne, et un critère de rumination nocturne pourrait donc également être pertinent.

4.1.2. Fermentations ruminales associées

Les deux types extrêmes de comportement alimentaires entraînent des profils de pH très différents, pour une quantité ingérée et un pH ruminal moyen similaires. Les animaux du groupe « vorace » présentent une chute de pH beaucoup plus marquée, en particulier entre 2 h et 8 h après la distribution du soir. Au niveau ruminal, ce groupe est tout d'abord caractérisé par une arrivée massive de glucides rapidement fermentescibles dans les deux à trois heures suivant la distribution. Par la suite, une quantité relativement importante de salive, et donc de substances tampons, est sécrétée pendant la nuit à la suite d'une rumination plus importante par gramme de matière sèche que pour les animaux du groupe « grignoteur ». Ce comportement entraîne donc une variation plus importante des paramètres ruminiaux au cours de la journée. Ces observations sont cohérentes avec celles de Jarrige *et al.* (1995) montrant que trois vaches laitières, présentant des poids vifs, des productions, des quantités ingérées (à volonté) et des vitesses d'ingestion moyennes similaires, pouvaient présenter des vitesses d'ingestion instantanées variant du simple au double en début de repas, et que celle qui ingérait le repas principal avec une vitesse extrêmement élevée présentait des variations plus importantes des paramètres physico-chimiques du rumen. Ces résultats sont également cohérents avec ceux de Kaufmann (1976) montrant qu'une augmentation du nombre de distributions des concentrés à des vaches laitières permettait d'augmenter la quantité de concentré ingérée, sans diminuer le pH ruminal, tout en augmentant la production laitière et la quantité de matière grasse du lait, mais aucune analyse individuelle n'était présentée. Ceci confirme que la répartition de l'ingestion au cours de la journée permet de limiter les variations des paramètres physico-chimiques du rumen. Aucune influence du comportement alimentaire sur la production laitière n'a, néanmoins, été mise en évidence dans ce travail. De plus, les deux chèvres produisant le plus de lait avant le passage en régime acidogène sont les animaux les plus extrêmes dans chaque groupe. Les analyses nécessitent cependant d'être approfondies pour pouvoir conclure sur ce point.

Pour une quantité totale ingérée similaire, les animaux du groupe « grignoteur » mastiquent moins leurs aliments par gramme de matière sèche, autant du point de vue de l'ingestion que du point de vue de la rumination que les animaux du groupe « vorace ». Ils présentent cependant un pH moyen quotidien similaire. Si l'on considère que la quantité de salive produite est principalement liée au temps passé à mastiquer et varie peu selon les individus, ces animaux produiraient moins de salive, et donc une quantité plus faible de tampons entrerait dans le rumen. D'un point de vue énergétique, les animaux du groupe « grignoteur » semblent donc dépenser moins d'énergie (pour la mastication) par gramme de

matière sèche ingérée, et il serait intéressant de pouvoir mesurer la digestibilité de la ration pour ces deux groupes d'animaux afin de déterminer si un type de comportement s'avère plus « efficace » que l'autre. Malheureusement, les mesures de comportement et de digestibilité ont été réalisées sur des groupes d'animaux différents, ce qui rend la comparaison impossible.

4.2. Susceptibilité des animaux à l'acidose

Les dix-huit chèvres utilisées pour ce travail ont présenté de zéro à quatre crises d'acidose pendant les onze semaines considérées (Tableau 2). De plus, le premier épisode d'acidose a été détecté dès la période de transition pour une chèvre, tandis que d'autres n'ont pas présenté d'acidose avant la période P4, c'est-à-dire huit semaines après le début de la distribution du régime acidogène. Ainsi, certaines chèvres semblent avoir réussi à faire face au régime acidogène pendant un certain temps, et n'ont déclenché une crise d'acidose qu'après sept à huit semaines sur ce régime. Il existe donc une très forte variabilité dans la réponse des animaux au régime acidogène et dans le déclenchement des épisodes d'acidose. Cette variabilité s'observe simultanément sur le nombre de crises par individu, l'intensité des crises entre les individus, ou entre deux crises pour un même individu, et le temps de latence entre la transition vers le régime acidogène et le déclenchement du premier épisode d'acidose. Brown *et al.* (2000) ont également observé que l'induction d'acidose par l'apport intra-ruminal d'une quantité plus ou moins importante de concentrés (1,5 à 3 % du poids vif) avait des conséquences variables selon les individus, certains développant une acidose aiguë, d'autres une acidose chronique, et d'autres ne semblant pas affectés. Même s'il a été précisé que les inductions artificielles d'acidose ne permettaient pas de reproduire les conséquences d'épisodes spontanés d'acidose, cela montre bien que la réponse des animaux à un même apport de concentré peut être très variable, et que certains individus parviennent à faire face à ces situations plus facilement que d'autres. Cela montre également que les différences observées dans le nombre et l'intensité des épisodes d'acidose dans notre expérience ne sont pas uniquement dues à des variations du comportement d'ingestion, car un apport intra-ruminal de glucides via une canule ruminale entraîne aussi des réponses très différentes suivant les animaux, montrant qu'il existe une variabilité de réponse au niveau du rumen.

L'analyse individuelle des paramètres ruminiaux et sanguins par une ACP (chapitre 4.2) a montré que les animaux ayant présenté le plus de crises d'acidose étaient représentés dans la même partie du plan de l'ACP, mais aucun paramètre, ou niveau d'un paramètre donné, n'a

Tableau 2. Occurrence des jours de début des crises d'acidose, période et intensité pour les 18 chèvres de l'expérience des chapitres 3, 4, 5 et 6 recevant des levures (Y) ou témoins (C). Les 6 chèvres grisées sont les animaux non canulés pour lesquelles le pH ruminal et le comportement n'ont pas été mesurés.

Chèvre	date	période	lot	Jour ^a	Intensité ^b
2087	06/05/2006	A2	C	73	3
2157	09/03/2006	A1	C	15	1
2157	13/04/2006	L	C	50	2
2157	18/05/2006	A2	C	85	2
3017	09/03/2006	A1	Y	15	1
3017	01/04/2006	L	Y	38	2
3019	08/04/2006	L	Y	45	2
3128	09/05/2006	A2	C	76	1
4012	21/03/2006	A1	C	27	3
4012	10/05/2006	A2	C	77	1
4029	08/03/2006	A1	Y	14	1
4031	15/04/2006	L	C	52	3
4031	08/05/2006	A2	C	75	1
4062	08/03/2006	A1	Y	14	3
4108	05/03/2006	T1	Y	11	3
4108	23/03/2006	A1	Y	29	2
4108	14/04/2006	L	Y	51	2
4108	05/05/2006	A2	Y	72	3
3054	07/03/2006	A1	C	13	3
3093	09/03/2006	A1	Y	15	2
4050	13/03/2006	A1	Y	19	2
4056	09/03/2006	A1	C	15	3
4056	04/04/2006	L	C	41	1

^a Numéro du jour compté à partir du début de l'expérience

^b 3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible

pu être spécifiquement identifié comme facteur de « risque ». Toutefois, cette ACP ayant été réalisée sur toute la période acidogène, il est difficile de déterminer si cette position groupée des animaux ayant présenté le plus d'épisodes d'acidose a été une cause ou une conséquence des nombreuses crises observées.

L'analyse individuelle du comportement alimentaire des animaux (chapitre 3.2) n'a pas non plus permis de mettre en évidence un comportement type qui pourrait être responsable de la plus grande susceptibilité à l'acidose de certains individus. En effet, les animaux qui présentent des cinétiques d'ingestion et de rumination entraînant des chutes de pH importantes, et certainement des paramètres physico-chimiques ruminiaux plus variables, n'ont pas été les animaux qui ont montré le plus de crises. De plus, les animaux qui ont eu le plus de crises d'acidose sont relativement bien répartis dans le plan de l'ACP, ce qui confirme l'absence de lien direct entre notre typologie du comportement et la susceptibilité des animaux à l'acidose. Cependant, l'ACP a été réalisée simultanément sur toutes les périodes de l'expérience. Une analyse individuelle et une caractérisation des paramètres ruminiaux et sanguins et du comportement alimentaire des animaux avant la distribution du régime acidogène aurait peut-être permis de mettre en évidence des critères expliquant la plus forte susceptibilité de certains animaux à l'acidose.

Cette étude a montré qu'il existe une très grande variabilité individuelle de comportement alimentaire, et que cette variabilité semble avoir été supérieure à la variabilité induite par le changement de régime ou par la supplémentation en levures.

La susceptibilité des animaux à l'acidose a également été très variable et des différences ont été observées pour le nombre de crises par individu, l'amplitude des crises intra- ou inter-individus, ainsi que le temps de latence avant le déclenchement de la première crise.

Aucun paramètre individuel permettant d'expliquer cette forte variabilité de susceptibilité à l'acidose n'a cependant pu être mis en évidence.

**CONCLUSION
ET PERSPECTIVES**

Conclusion

L'ensemble des données recueillies pendant ce travail a permis de montrer les nombreux liens existant entre paramètres zootechniques, ruminiaux, comportementaux et métaboliques, et de montrer que les interprétations des résultats peuvent être biaisées lorsque l'un de ces paramètres n'est pas pris en compte. Plus précisément, les mesures très fréquentes de paramètres clés ont permis de définir et de modéliser les conséquences à court et moyen terme de nombreuses crises d'acidose spontanées. Ces crises restent, toutefois, imprévisibles, du point de vue de leur apparition et de leur intensité, dans la mesure où aucun des paramètres mesurés n'a pu être identifié comme signe précurseur des crises. Ce dernier point soulève un problème majeur concernant l'acidose sub-clinique, responsable de pertes financières non négligeables dans les élevages, car il est trop tard pour prévenir la crise lorsque les premiers symptômes apparaissent.

La méta-analyse réalisée sur les conséquences d'une supplémentation en levures a montré que les levures pouvaient réguler les fermentations ruminales. Cet effet est, néanmoins, modifié par des facteurs interférents tels que la composition du régime ou le niveau d'ingestion des animaux. L'apport de levures paraît à privilégier pour les animaux à fort niveaux d'ingestion et recevant des rations riches en concentré. Notre analyse a cependant montré que, dans le cas de régimes riches en concentré, l'effet des levures pouvait être masqué par certains phénomènes, tels que les crises ponctuelles d'acidose, ce qui rend l'interprétation des résultats délicate si ces crises d'acidose ne peuvent pas être précisément identifiées.

De très nombreux phénomènes de délais, latences et rémanences ont été observés pour les crises d'acidose comme pour la supplémentation en levures. Ces phénomènes résultent très certainement des mécanismes de régulations homéostasiques de l'animal, ainsi que du temps de stabilisation nécessaire à l'écosystème microbien ruminal suite à une perturbation. Ces mécanismes permettent de limiter les déviations brutales pouvant conduire à la mort de l'animal. Toutefois, ils rendent les analyses délicates, car la modification d'un paramètre donné peut résulter de la modification d'un autre paramètre pendant les minutes, heures, ou jours précédents. Les analyses dynamiques, de type modélisation, ainsi que des mesures fréquentes de tous les paramètres sont alors à privilégier pour mieux comprendre les différents mécanismes successivement impliqués dans la régulation des crises d'acidose ou dans la modification progressive du métabolisme, suite à une supplémentation en levures.

De nombreuses perspectives découlent de ces conclusions. Tout d'abord, l'analyse de l'acidose sub-clinique d'un point de vue dynamique, par la création d'un modèle mécaniste de l'acidose par exemple, nécessite la création d'une base de données importante, comprenant tous les types de paramètres mesurés pendant ce travail, car tous ont été modifiés pendant les épisodes d'acidose. D'autres paramètres non mesurés ici, pourraient également se révéler pertinents.

D'un point de vue expérimental, les conclusions de ce travail remettent en question l'utilisation des mêmes chèvres expérimentales dans plusieurs expériences successives impliquant des régimes potentiellement acidogènes, car les conséquences à long terme des crises peuvent modifier les résultats des expériences suivantes. De plus, la grande variabilité du comportement alimentaire individuel souligne la nécessité de prendre en compte ce paramètre lors de la mise en lots, ou lors des analyses, car les fermentations ruminales sont fortement influencées par les différents types de comportements alimentaires, ce qui peut biaiser les résultats si cela n'est pas pris en compte.

Enfin, pour tenter de déterminer s'il existe un lien entre la variabilité individuelle du comportement alimentaire ou des paramètres physiologiques et la susceptibilité des animaux à l'acidose, il serait intéressant de réaliser une typologie du comportement et des paramètres physiologiques et métaboliques des animaux, par une analyse multivariée, sur des animaux naïfs vis-à-vis de l'acidose et n'ayant jamais reçu de régimes riches en concentré, avant de leur distribuer un régime riche en concentré. L'observation et la caractérisation des crises d'acidose, puis la réalisation d'une nouvelle typologie sur les mêmes paramètres après plusieurs semaines sur ce régime pourraient alors permettre de différencier la part de variabilité entraînant une plus forte susceptibilité des animaux à l'acidose, de celle résultant de la présence ou de l'absence de crises d'acidose.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

citées en introduction et en discussion

Références bibliographiques

- Abd El-Ghani, A. A. 2004. Influence of diet supplementation with yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on performance of Zaraibi goats. *Small Rumin. Res.* 52: 223-229.
- Abijaoude, J. A. 1999. Influence de la nature du régime sur le comportement alimentaire, la digestion, le métabolisme et les performances des chèvres laitières. Thèse de doctorat: Institut national agronomique Paris-Grignon. 138 p
- Abijaoude, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P. et Sauvant, D. 2000a. Diet effect on the daily feeding behaviour, frequency and characteristics of meals in dairy goats. *Livest. Prod. Sci.* 64: 29-37.
- Abijaoude, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P. et Sauvant, D. 2000b. Influence of forage: concentrate ratio and type of starch in the diet on feeding behaviour, dietary preferences, digestion, metabolism and performance of dairy goats in mid lactation. *Anim. Sci.* 71: 359-368.
- Abijaoude, J. A., Morand-Fehr, P., Tessier, J., Schmidely, P. et Sauvant, D. 2000c. Contribution of main and secondary meals to the daily intake of stall-housed dairy goats in mid lactation. *Options mediterr., Ser. A* 52: 33-37.
- Adams, D. C., Galyean, M. L., Kiesling, H. E., Wallace, J. D. et Finkner, M. D. 1981. Influence of viable yeast culture, sodium bicarbonate and monensin on liquid dilution rate, rumen fermentation and feedlot performance of growing steers and digestibility in lambs. *J. Anim. Sci.* 53: 780-789.
- Ali-Haimoud-Lekhal, D., Lescoat, P., Bayourthe, C. et Moncoulon, R. 1999. Effets de *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus oryzae* sur les performances zootechniques chez la vache laitière : étude bibliographique. 6èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, 1999/12/1-2. 157.
- Allen, M. S. 2000. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 83: 1598-1624.
- Arakaki, L. C., Stahringer, R. C., Garrett, J. E. et Dehority, B. A. 2000. The effects of feeding monensin and yeast culture, alone or in combination, on the concentration and generic composition of rumen protozoa in steers fed on low-quality pasture supplemented with increasing levels of concentrate. *Anim. Feed Sci. Technol.* 84: 121-127.
- Arambel, M. J. et Kent, B. A. 1990. Effect of yeast culture on nutrient digestibility and milk yield response in early- to midlactation dairy cows. *J. Dairy Sci.* 73: 1560-1563.
- Auclair, E. 2001. Yeast as an example of the mode of action of probiotics in monogastric and ruminant species. *Options mediterr., Ser. A* 54: 45-53.
- Bach, A., Iglesias, C. et Devant, M. 2007. Daily rumen pH pattern of loose-housed dairy

- cattle as affected by feeding pattern and live yeast supplementation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 136: 146-153.
- Baile, C. A. et Mayer, J. 1969. Depression of feed intake of goats by metabolites injected during meals. *Am. J. Physiol.* 217: 1830-1836.
- Bauer, M. L., Herold, D. W., Britton, R. A., Stock, R. A., Klopfenstein, T. J. et Yates, D. A. 1995. Efficacy of laidlomycin propionate to reduce ruminal acidosis in cattle. *J. Anim. Sci.* 73: 3445-3454.
- Baumann, T. A., Radunz, A. E., Lardy, G. P., Anderson, V. L., Caton, J. S. et Bauer, M. L. 2004. Effects of tempering and a yeast-enzyme mixture on intake, ruminal fermentation, in situ disappearance, performance, and carcass traits in steers fed barley-based diets. *Prof. Anim. Sci.* 20: 178-184.
- Baumont, R. 1996. Palatabilité et comportement alimentaire chez les ruminants. *Prod. Anim.* 9: 349-358.
- Baumont, R., Dulphy, J. P. et Demarquilly, C. 1997. Maximiser l'ingestion de fourrages conservés. 4èmes rencontres autour des recherches sur les ruminants, Paris, France, 4 et 5 décembre 1997. Institut l'Elevage. 57-64.
- Baumont, R., Prache, S., Meuret, M. et Morand-Fehr, P. 2000. How forage characteristics influence behaviour and intake in small ruminants: a review. *Livest. Prod. Sci.* 64: 15-28.
- Beauchemin, K. A., Kachanosky, R. G., Schaalje, G. B. et Buchanan-Smith, J. G. 1990. Characterizing rumination patterns of dairy cows using spectral analysis. *J. Anim. Sci.* 68: 3163-3170.
- Beauchemin, K. A., Yang, W. Z., Morgavi, D. P., Ghorbani, G. R., Kautz, W. et Leedle, J. A. Z. 2003. Effects of bacterial direct-fed microbials and yeast on site and extent of digestion, blood chemistry, and subclinical ruminal acidosis in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81: 1628-1640.
- Beauchemin, K. A. et Yang, W. Z. 2005. Effects of physically effective fiber on intake, chewing activity, and ruminal acidosis for dairy cows fed diets based on corn silage. *J. Dairy Sci.* 88: 2117-2129.
- Bergen, W. G. 1972. Rumen Osmolality as a Factor in Feed Intake Control of Sheep. *J. Anim. Sci.* 34: 1054-1060.
- Bernard, J. K. 1992. Influence of supplemental yeast on the performance of Holstein cows during early lactation. *J. Dairy Sci.* 75 (Suppl. 1): 312.
- Bouisset, S. 1998. Acidoses nutritionnelles chez la vache laitière française (Aspects cliniques, conséquences sur la production et la reproduction). *Atti. Soc. Ital. Bui.* 30: 480-503.
- Bowman, G. R., Beauchemin, K. A. et Shelford, J. A. 2003. Fibrolytic enzymes and parity effects on feeding behavior, salivation, and ruminal pH of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86: 565-575.

- Braun, U., Rihs, T. et Schefer, U. 1992. Ruminal lactic acidosis in sheep and goats. *Vet. Rec.* 130: 343-349.
- Brossard, L., Martin, C., Chaucheyras-Durand, F. et Michalet-Doreau, B. 2004. Protozoa involved in butyric rather than lactic fermentative pattern during latent acidosis in sheep. *Reprod. Nutr. Dev.* 44: 195-206.
- Brown, M. S., Krehbiel, C. R., Galyean, M. L., Remmenga, M. D., Peters, J. P., Hibbard, B., Robinson, J. et Moseley, W. M. 2000. Evaluation of models of acute and subacute acidosis on dry matter intake, ruminal fermentation, blood chemistry, and endocrine profiles of beef steers. *J. Anim. Sci.* 78: 3155-3168.
- Brugère, H. 2003. Physiopathologie de l'acidose latente du rumen. *Actualités en pathologie bovine*, 12 juin 2003. ENV-Alfort. 22 p.
- Buño, L. 1975. Role de l'acide DL-lactique dans le contrôle de l'ingestion alimentaire chez le mouton. *Ann. Rech. Vet.* 6: 325-335.
- Cao, G. R., English, P. B., Filippich, L. J. et Inglis, S. 1987. Experimentally induced lactic acidosis in the goat. *Aust. Vet. J.* 64: 367-370.
- Carvalho, S., Rodrigues, M. T., Branco, R. H. et Rodrigues, C. A. F. 2006. Comportamento ingestivo de cabras Alpinas em lactação alimentadas com dietas contendo diferentes níveis de fibra em detergente neutro proveniente da forragem. *Rev. Bras. Zootec.* 35: 562-568.
- Castro, T., Manso, T., Mantecon, A. R. et Carro, M. D. 2002. Effect of either once or twice daily concentrate supplementation of wheat straw on voluntary intake and digestion in sheep. *Small Rumin. Res.* 46: 43-50.
- Chaucheyras-Durand, F. et Fonty, G. 2002. Yeasts in ruminant nutrition. Experiences with a live yeast product. *Kraftfutter* 85: 146-150.
- Chesworth, J. 1996. L'alimentation des ruminants. *Le technicien d'agriculture tropicale*. Ed. 34: 139-157.
- Chiquette, J. 1995. *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae*, used alone or in combination, as a feed supplement for beef and dairy cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 75: 405-415.
- Coe, M. L., Nagaraja, T. G., Sun, Y. D., Wallace, N., Towne, E. G., Kemp, K. E. et Hutcheson, J. P. 1999. Effect of virginiamycin on ruminal fermentation in cattle during adaptation to a high concentrate diet and during an induced acidosis. *J. Anim. Sci.* 77: 2259-2268.
- Coléou, J. 1984. Les relations animal aliments. *Alimentation des animaux et développement des productions*. Ed. I. DSA. 4: 3-46.
- Conrad, H. R. 1966. Symposium on factors influencing the voluntary intake of herbage by ruminants : physiological and physical factors limiting feed intake. *J. Anim. Sci.*: 227-225.

- Cooper, R. J., Klopfenstein, T. J., Stock, R. A., Milton, C. T., Herold, D. W. et Parrott, J. C. 1999. Effects of imposed feed intake variation on acidosis and performance of finishing steers. *J. Anim. Sci.* 77: 1093-1099.
- Cooper, S. D., Kyriazakis, I. et Oldham, J. D. 1996. The effects of physical form of feed, carbohydrate source, and inclusion of sodium bicarbonate on the diet selections of sheep. *J. Anim. Sci.* 74: 1240-1251.
- Cooper, S. D. B. et Kyriazakis, I. 1993. The diet selection of lambs offered food choices of different nutrient density. *Anim. Prod.* 56: 469.
- Corona, L., Mendoza, G. D., Castrejon, F. A., Crosby, M. M. et Cobos, M. A. 1999. Evaluation of two yeast cultures (*Saccharomyces cerevisiae*) on ruminal fermentation and digestion in sheep fed a corn stover diet. *Small Rumin. Res.* 31: 209-214.
- Cumby, J. L., Plaizier, J. C., Kyriazakis, I. et McBride, B. W. 2001. Short communication : Effect of subacute ruminal acidosis on the preference of cows for pellets containing sodium bicarbonate. *Can. J. Anim. Sci.* 81: 149-152.
- Dann, H. M., Drackley, J. K., McCoy, G. C., Hutjens, M. F. et Garrett, J. E. 2000. Effects of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on prepartum intake and postpartum intake and milk production of jersey cows. *J. Dairy Sci.* 83: 123-127.
- De Queiroz, R. C., Bergamaschine, A. F., Bastos, J. F. P., Santos, P. C. d. et Lemos, G. C. 2004. Use of enzymes and yeast in the cattle diet: nutrient digestibility and performance in feedlots. *Rev. Bras. Zootec.* 33: 1548-1556.
- Deswysen, A. G., Dutilleul, P., Godfrin, J. P. et Ellis, W. C. 1993. Nycterohemeral eating and ruminating patterns in heifers fed grass or corn-silage - Analysis by finite Fourier-transform. *J. Anim. Sci.* 71: 2739-2747.
- Dijkstra, J., Boer, H., Van Bruchem, J., Bruining, M. et Tamminga, S. 1993. Absorption of volatile fatty acids from the rumen of lactating dairy cows as influenced by volatile fatty acid concentration, pH and rumen liquid volume. *Br. J. Nutr.* 69: 385-396.
- Doreau, M. et Jouany, J. P. 1998. Effect of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on nutrient digestion in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81: 3214-3221.
- Dragomir, C., Sauvant, D., Michalet Doreau, B., Peyraud, J. L. et Giger-Reverdin, S. 2008. Meta-Analysis of 0-8 Hours post-prandial kinetics of ruminal pH. *Animal* In press.
- Dulphy, J. P. et Carle, B. 1986. Activités alimentaires et méryciques comparées des bovins, des caprins et des ovins. *Reprod. Nutr. Dev.* 26: 279-280.
- Dulphy, J. P. et Faverdin, P. 1987. L'ingestion alimentaire chez les ruminants : modalités et phénomènes associés. *Reprod. Nutr. Dev.* 27: 129-155.
- Dulphy, J. P., Elmeddah, Y. et Baumont, R. 1988. Influence du rythme de distribution sur les activités alimentaires et l'évolution journalière du contenu ruminal chez le mouton. *Reprod. Nutr. Dev.* 28: 919-929.
- Dulphy, J. P., Carle, B. et Demarquilly, C. 1990. Quantités ingérées et activités alimentaires

- comparées des ovins, bovins et caprins recevant des fourrages conservés avec ou sans aliment concentré. I. Etude descriptive. *Ann. Zootech.* 39: 95-111.
- Elam, C. J. 1976. Acidosis in feedlot cattle: practical observations. *J. Anim. Sci.* 43: 898-901.
- Erasmus, L. J., Botha, P. M. et Kistner, A. 1992. Effect of yeast culture supplement on production, rumen fermentation, and duodenal nitrogen flow in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 75: 3056-3065.
- Erdman, R. A. et Sharma, B. K. 1989. Effect of yeast culture and sodium bicarbonate on milk yield and composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 72: 1929-1932.
- Farid, M. F. A., Khamis, H. S., Abou El-Nasr, H. M., Ahmed, M. H. et Shawket, S. M. 1997. Diet selection and food intake capacity of stall-fed sheep, goats and camels in relation to some physical properties of foods and their potential digestion in the rumen. *Options mediterr., Ser. A* 34: 109-114.
- Fedele, V., Rubino, R. et Claps, S. 1997. Effects of the type of protein concentrate free choice offered on goat feeding behaviour. *Options mediterr., Ser. A* 83-86.
- Fischer, V., Deswysen, A. G., Dutilleul, P. et De Boever, J. 2002. Ingestive behavior nycterohemeral patterns of dairy cows, at the beginning and at the end of lactation, fed a corn silage based diet. *Rev. Bras. Zootec.* 31: 2129-2138.
- Focant, M. 1984. Comportement alimentaire, rumination, fermentations réticulo-ruminales et acides gras volatils plasmatiques, comparés chez la chèvre et le mouton; influence du régime. *Reprod. Nutr. Dev.* 24: 239-250.
- Forbes, J. M. 1992. Metabolic aspects of satiety. *Proc. Nutr. Soc.* 51: 13-19.
- Forbes, J. M. et Kyriazakis, I. 1995. Food preferences in farm animals: why don't they always choose wisely? *Proc. Nutr. Soc.* 54: 429-440.
- Forbes, J. M. 1998. Dietary awareness. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 57: 287-297.
- Forbes, J. M. 2007. A personal view of how ruminant animals control their intake and choice of food: minimal total discomfort. *Nutr. Res. Rev.* 20: 132-146.
- Fulton, W. R., Klopfenstein, T. J. et Britton, R. A. 1979. Adaptation to high concentrate diets by beef cattle. 2. Effect of ruminal pH alteration on rumen fermentation and voluntary intake of wheat diets. *J. Anim. Sci.* 49: 785-789.
- Gallouin, F. et Focant, M. 1980. Bases physiologiques du comportement alimentaire chez les ruminants. *Reprod. Nutr. Dev.* 20: 1563-1614.
- Gallouin, F. et Le Magnen, J. 1987. Évolution historique des concepts de faim, satiété et appétits. *Reprod. Nutr. Dev.* 27: 109-128.
- Garcia, C. C. G., Mendoza, M. G. D., Gonzalez, M. S., Cobos, P. M., Ortega, C. M. E. et Ramirez, L. R. 2000. Effect of a yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) and monensin on ruminal fermentation and digestion in sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 83: 165-170.
- Geoffroy, F. 1974. Etude comparée du comportement alimentaire et mérycique de deux petits

- ruminants : la chèvre et le mouton. *Ann. Zootech.* 23: 63-73.
- Giger-Reverdin, S., Bezault, N., Sauvant, D. et Bertin, G. 1996. Effects of a probiotic yeast in lactating ruminants: interaction with dietary nitrogen level. *Anim. Feed Sci. Technol.* 63: 149-162.
- Giger-Reverdin, S., Duvaux-Ponter, C., Sauvant, D., Martin, O., Nunes do Prado, I. et Müller, R. 2002. Intrinsic buffering capacity of feedstuffs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 96: 83-102.
- Giger-Reverdin, S., Duvaux-Ponter, C., Desnoyers, M., Tessier, J., Ternois, F. et Sauvant, D. 2006. Capacité physiologique du ruminant à tamponner les effets de l'alimentation. 13èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France, 2006/12/06-07. INRA - Institut de l'Elevage.
- Grant, R. J., Colenbrander, V. F. et Mertens, D. R. 1990. Milk fat depression in dairy cows: role of silage particle size. *J. Dairy Sci.* 73: 1834-1842.
- Grant, R. J. et Albright, J. L. 2001. Effects of animal grouping on feeding behaviour and intake of dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 84 (E. suppl.): 156-163.
- Greenhalgh, J. F. D. et Reid, G. W. 1971. Relative palatability to sheep of straw, hay and dried grass. *Br. J. Nutr.* 26: 107-116.
- Ha, J. K., Emerick, R. J. et Embry, L. B. 1983. In vitro effect of pH variations on rumen fermentation, and in vivo effects of buffers in lambs before and after adaptation to high concentrate diets. *J. Anim. Sci.* 56: 698-706.
- Hadjipanayiotou, M., Antoniou, I. et Photiou, A. 1997. Effects of the inclusion of yeast culture on the performance of dairy ewes and goats and the degradation of feedstuffs. *Livest. Prod. Sci.* 48: 129-134.
- Harmon, D. L., Britton, R. A., Prior, R. L. et Stock, R. A. 1985. Net portal absorption of lactate and volatile fatty acids in steers experiencing glucose-induced acidosis or fed a 70% concentrate diet ad libitum. *J. Anim. Sci.* 60: 560-569.
- Hart, S. P. et Polan, C. E. 1984. Effect of sodium bicarbonate and disodium phosphate on animal performance, ruminal metabolism, digestion, and rate of passage in ruminating calves. *J. Dairy Sci.* 67: 2356-2368.
- Hart, S. P. et Glimp, H. A. 1991. Effect of diet composition and feed intake level on diet digestibility and ruminal metabolism in growing lambs. *J. Anim. Sci.* 69: 1636-1644.
- Heinrichs, A. J. et Conrad, H. R. 1987. Measuring feed intake patterns and meal size of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 70: 705-711.
- Hernandez-Urdaneta, A., Coppock, C. E., McDowell, R. E., Gianola, D. et Smith, N. E. 1976. Changes in forage-concentrate ratio of complete feeds for dairy cows. *J. Dairy Sci.* 59: 695-707.
- Higginbotham, G. E., Collar, C. A., Aseltine, M. S. et Bath, D. L. 1994. Effect of yeast culture and *Aspergillus oryzae* extract on milk yield in a commercial dairy herd. *J.*

- Dairy Sci. 77: 343-348.
- Huber, T. L. 1976. Physiological effects of acidosis on feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 43: 902-909.
- Ingrand, S. 2000. Feeding behaviour, intake and performance in beef cattle managed in groups (Comportement alimentaire, quantités ingérées et performances des bovins conduits en groupe). *Prod. Anim.* 13: 151-163.
- James, S. M. et Kyriazakis, I. 2002. The effect of consumption of foods that differ in energy density and/or sodium bicarbonate supplementation on subsequent diet selection in sheep. *Br. J. Nutr.* 88: 81-90.
- Jarrige, R. 1988. Ingestion et digestion des aliments. *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Ed. Paris, INRA: 34-40.
- Jarrige, R., Dulphy, J. P., Favardin, P., Baumont, R. et Demarquilly, C. 1995. Activités d'ingestion et de rumination. *Nutrition des ruminants domestiques*. Ed. R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.-H. Farce et M. Journet, INRA: 123-181.
- Jean-Blain, C. 2002. Introduction à la nutrition des animaux domestiques. Ed. Tec&Doc: p 205-209, 216, 224.
- Jouany, J. P. et Thivend, P. 1972. Evolution postprandiale de la composition glucidique des corps microbiens du rumen en fonction de la nature des glucides du régime. 1. Les protozoaires. *Ann. Biol. Anim. Biochim. Biophys.* 12: 673-677.
- Jouany, J. P., Mathieu, F., Senaud, J., Bohatier, J., Bertin, G. et Mercier, M. 1998a. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on the digestion of nitrogen in the rumen of defaunated and refaunated sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* 75: 1-13.
- Jouany, J. P., Mathieu, F., Senaud, J., Bohatier, J., Bertin, G. et Mercier, M. 1998b. The effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on the digestion of the cell wall fraction of a mixed diet in defaunated and refaunated sheep rumen. *Reprod. Nutr. Dev.* 38: 401-416.
- Jouany, J. P. 2006. Optimizing rumen functions in the close-up transition period and early lactation to drive dry matter intake and energy balance in cows. *Anim. Reprod. Sci.* 96: 250-264.
- Jouany, J.-P., Mathieu, F., Senaud, J., Bohatier, J., Bertin, G. et Mercier, M. 1999. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on the population of rumen microbes and their polysaccharidase activities. *S. Afri. J. Anim. Sci.* 29: 6-7.
- Jouany, J.-P. 2001. A new look at yeast cultures as probiotics for ruminants. *Feed Mix* 9: 17-19.
- Journet, M. et Rémond, B. 1976. Physiological factors affecting the voluntary intake of feed by cows: a review. *Livest. Prod. Sci.* 3: 129-146.
- Journet, M. 1995. Optimisation des rations. *Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion*. Ed. Y. R. R Jarrige, C Demarquilly, MH Farce and M Journet, Institut

- National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris, France.: 121-135.
- Karr, K. J., MCLeod, K. R., Dawson, K. A., Tucker, R. E. et Mitchell, G. E. 1991a. Influence of yeast culture and/or monensin on nitrogen flow and rumen fermentation in sheep. 7th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Karr, K. J., MCLeod, K. R., Dawson, K. A., Tucker, R. E. et Mitchell, G. E. 1991b. Influence of yeast culture and/or monensin on nitrogen flow and rumen fermentation in sheep (poster). Alltech's 7th annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry, Lexington, KY, USA.
- Kaufmann, W. 1976. Influence of the composition of the ration and the feeding frequency on pH-regulation in the rumen and on feed intake in ruminants. *Livest. Prod. Sci.* 3: 103-114.
- Kawas, J. R., Lopes, J., Danelon, D. L. et Lu, C. D. 1991. Influence of forage-to-concentrate ratio on intake, digestibility, chewing and milk production of dairy goats. *Small Rumin. Res.* 4: 11-18.
- Keunen, J. E., Plaizier, J. C., Kyriazakis, L., Duffield, T. F., Widowski, T. M., Lindinger, M. I. et McBride, B. W. 2002. Effects of a subacute ruminal acidosis model on the diet selection of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85: 3304-3313.
- Keunen, J. E., Plaizier, J. C., Kyriazakis, I., Duffield, T. F., Widowski, T. M., Lindinger, M. I. et McBride, B. W. 2003. Short communication: effects of subacute ruminal acidosis on free-choice intake of sodium bicarbonate in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86: 954-957.
- Kezar, W. W. et Church, D. C. 1979. Ruminal changes during the onset and recovery of induced lactic acidosis in sheep. *J. Anim. Sci.* 49: 1161-1167.
- Kleen, J. L., Hooijer, G. A., Rehage, J. et Noordhuizen, J. P. T. M. 2003. Subacute ruminal acidosis (SARA): a review. *J. Vet. Med. Ser. A.* 50: 406-414.
- Klusmeyer, T. H., Cameron, M. R., McCoy, G. C. et Clark, J. H. 1990. Effects of feed processing and frequency of feeding on ruminal fermentation, milk production, and milk composition. *J. Dairy Sci.* 73: 3538-3543.
- Krause, K. M., Combs, D. K. et Beauchemin, K. A. 2002. Effects of forage particle size and grain fermentability in midlactation cows. II. Ruminal pH and chewing activity. *J. Dairy Sci.* 85: 1947-1957.
- Krause, K. M. et Oetzel, G. R. 2005. Inducing subacute ruminal acidosis in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 88: 3633-3639.
- Krause, K. M. et Oetzel, G. R. 2006. Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126: 215-236.
- Krehbiel, C. R., Britton, R. A., Harmon, D. L., Wester, T. J. et Stock, R. A. 1995a. The effects of ruminal acidosis on volatile fatty acid absorption and plasma activities of pancreatic enzymes in lambs. *J. Anim. Sci.* 73: 3111-3121.

- Krehbiel, C. R., Stock, R. A., Herold, D. W., Shain, D. H., Ham, G. A. et Carulla, J. E. 1995b. Feeding wet corn gluten feed to reduce subacute acidosis in cattle. *J. Anim. Sci.* 73: 2931-2939.
- Kung, L., Kreck, E. M., Tung, R. S., Hession, A. O., Sheperd, A. C., Cohen, M. A., Swain, H. E. et Leedle, J. A. Z. 1997. Effects of a live yeast culture and enzymes on in vitro ruminal fermentation and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 80: 2045-2051.
- Lescoat, P., Danfaer, A. et Sauvant, D. 1996. Discussion of methods in building and validating a model: example of amino acid metabolism in ruminants. *Ann. Zootech.* 45 (Suppl.): 237-255.
- Lescoat, P., Ali-Haimoud-Lekhal, D. et Bayourthe, C. 2000. Effets de *Saccharomyces cerevisiae* et *Aspergillus Oryzae* sur la digestion et le fonctionnement ruminal : étude bibliographique. 7èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France. 199.
- Lesmeister, K. E., Heinrichs, A. J. et Gabler, M. T. 2004. Effects of supplemental yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) culture on rumen development, growth characteristics, and blood parameters in neonatal dairy calves. *J. Dairy Sci.* 87: 1832-1839.
- Lewis, G. E., Hunt, C. W., Sanchez, W. K., Treacher, R., Pritchard, G. T. et Feng, P. 1996. Effect of direct-fed fibrolytic enzymes on the digestive characteristics of a forage-based diet fed to beef steers. *J. Anim. Sci.* 74: 3020-3028.
- Macleod, G. K., Grieve, D. G. et McMillan, I. 1983. Performance of first lactation dairy cows ded complete rations of several ratios of forage to concentrate. *J. Dairy Sci.* 66: 1668-1674.
- Maekawa, M., Beauchemin, K. A. et Christensen, D. A. 2002a. Chewing activity, saliva production, and ruminal pH of primiparous and multiparous lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85: 1176-1182.
- Maekawa, M., Beauchemin, K. A. et Christensen, D. A. 2002b. Effect of concentrate level and feeding management on chewing activities, saliva production, and ruminal pH of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85: 1165-1175.
- Malestein, A., Klooster, A. T. v. t., Prins, R. A. et Counotte, G. H. M. 1984. Concentrate feeding and ruminal fermentation. 3. Influence of concentrate ingredients on pH, on DL-lactic acid concentration in rumen fluid of dairy cows and on dry matter intake. *Neth. J. agric. Sci.* 32: 9-21.
- Martin, C., Brossard, L. et Doreau, M. 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *Prod. Anim.* 19: 93-108.
- Masson, C., Kirilov, D., Faurie, F. et Tisserand, J. L. 1989. Comparaison des activités alimentaires et méryciques d'ovins et de caprins recevant de la paille d'orge traitée ou non à la soude. *Ann. Zootech.* 38: 73-82.

- Mathieu, F., Jouany, J.-P., Bertin, G. et Senaud, J. 1996a. Comparative effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on rumen fermentations. *Ann. Zootech.* 45 (Suppl.): 336.
- Mathieu, F., Jouany, J. P., Senaud, J., Bohatier, J., Bertin, G. et Mercier, M. 1996b. The effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* on fermentations in the rumen of faunated and defaunated sheep; protozoal and probiotic interactions. *Reprod. Nutr. Dev.* 36: 271-287.
- Mbanya, J. N., Anil, M. H. et Forbes, J. M. 1993. The voluntary intake of hay and silage by lactating cows in response to ruminal infusion of acetate or propionate, or both, with or without distension of the rumen by a balloon. *Br. J. Nutr.* 69: 713-720.
- Mertens, D. R. 1996. Methods in modelling feeding behaviour and intake in herbivores. *Ann. Zootech.* 45 (Suppl.): 153-164.
- Mir, Z. et Mir, P. S. 1994. Effect of the addition of live yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) on growth and carcass quality of steers fed high-forage or high-grain diets and on feed digestibility and in situ degradability. *J. Anim. Sci.* 72: 537-545.
- Miranda, R. L. A., Mendoza, M. G. D., Barcena-Gama, J. R., Gonzalez, M. S. S., Ferrara, R., Ortega, C. M. E. et Cobos, P. M. A. 1996. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* or *Aspergillus oryzae* cultures and NDF level on parameters of ruminal fermentation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 63: 289-296.
- Mohamed Nour, M. S., Abusamra, M. T. et Hago, B. E. D. 1999. Experimentally induced lactic acidosis in Nubian goats: clinical, biochemical and pathological investigations. *Small Rumin. Res.* 31: 7-17.
- Montgomery, M. J., Schultz, L. H. et Baumgardt, B. R. 1963. Effect of Intraruminal Infusion of Volatile Fatty Acids and Lactic Acid on Voluntary Hay Intake. *J. Dairy Sci.* 46: 1380-1384.
- Montgomery, M. J. et Baumgardt, B. R. 1965a. Regulation of food intake in ruminants. 2. Rations varying in energy concentration and physical form. *J. Dairy Sci.* 48: 1623-1628.
- Montgomery, M. J. et Baumgardt, B. R. 1965b. Regulation of food intake in ruminants. 1. Pelleted Rations Varying in Energy Concentration. *J. Dairy Sci.* 48: 569-574.
- Morand-Fehr, P. 2003. Dietary choices of goats at the trough. *Small Rumin. Res.* 49: 231-239.
- Mutsvangwa, T., Edwards, I. E., Topps, J. H. et Paterson, G. F. M. 1992. The effect of dietary inclusion of yeast culture (Yea-Sacc) on patterns of rumen fermentation, food intake and growth of intensively fed bulls. *Anim. Prod.* 55: 35-40.
- Nelson, B. D., Ellzey, H. D., Morgan, E. B. et Allen, M. 1968. Effects of feeding lactating dairy cows varying forage-to-concentrate ratios. *J. Dairy Sci.* 51: 1796-1800.
- Newbold, C. J., Wallace, R. J., Chen, X. B. et McIntosh, F. M. 1995. Different strains of

- Saccharomyces cerevisiae* differ in their effects on ruminal bacterial numbers in vitro and in sheep. *J. Anim. Sci.* 73: 1811-1818.
- Nielsen, B. L. 1999. On the interpretation of feeding behaviour measures and the use of feeding rate as an indicator of social constraint. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 63: 79-91.
- Nocek, J. E. 1997. Bovine acidosis: implications on laminitis. *J. Dairy Sci.* 80: 1005-1028.
- Nordlund, K. 2003. Factors that contribute to subacute ruminal acidosis. Preconvention Seminar 7: Dairy Herd Problem Investigation Strategies. American Association of bovine practitioners. 36th annual conference, Columbus, Ohio, USA, September 15-17, 2003. 5 p.
- NRC. 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. Washington: National Academy Press.
- Oellermann, S. O., Arambel, M. J., Kent, B. A. et Walters, J. L. 1990. Effect of graded amounts of *Aspergillus oryzae* fermentation extract on ruminal characteristics and nutrient digestibility in cattle. *J. Dairy Sci.* 73.
- Oetzel, G. R. 2000. Clinical aspects of ruminal acidosis in dairy cattle. 33rd Annual Conference, American Association of Bovine Practitioners, Rapid City, South Dakota, Usa, September 21-23, 2000. 14 pages.
- Oetzel, G. R. 2003a. Nutritional management and subacute ruminal acidosis in dairy herds. 36th Annual Conference, American Association of Bovine Practitioners, Columbus, Ohio, Usa, September 15-17, 2003. 12 pages.
- Oetzel, G. R. 2003b. Introduction to ruminal acidosis in dairy cattle. Preconvention Seminar 7: Dairy Herd Problem Investigation Strategies. American Association of bovine practitioners. 36th annual conference, Columbus, Ohio, USA, September 15-17, 2003. 11 pages.
- Offner, A., Bach, A. et Sauvant, D. 2003. Quantitative review of in situ starch degradation in the rumen. *Anim. Feed Sci. Technol.* 106: 81-93.
- Owens, F. N., Secrist, D. S., Hill, W. J. et Gill, D. R. 1998. Acidosis in cattle: A review. *J. Anim. Sci.* 76: 275-286.
- Patra, R. C., Lal, S. B. et Swarup, D. 1996. Biochemical profile of rumen liquor, blood and urine in experimental acidosis in sheep. *Small Rumin. Res.* 19: 177-180.
- Peyraud, J. L. et Apper-Bossard, E. 2006. L'acidose latente chez la vache laitière. *Prod. Anim.* 19: 79-92.
- Phy, T. S. et Provenza, F. D. 1998. Sheep fed grain prefer foods and solutions that attenuate acidosis. *J. Anim. Sci.* 76: 954-960.
- Pinos-Rodriguez, J. M., Gonzalez, S. S., Mendoza, G. D., Barcena, R., Cobos, M. A., Hernandez, A. et Ortega, M. E. 2002. Effect of exogenous fibrolytic enzyme on ruminal fermentation and digestibility of alfalfa and rye-grass hay fed to lambs. *J. Anim. Sci.* 80: 3016-3020.
- Piva, G., Belladonna, S., Fusconi, G. et Sicbaldi, F. 1993. Effects of yeast on dairy cow

- performance, ruminal fermentation, blood components, and milk manufacturing properties. *J. Dairy Sci.* 76: 2717-2722.
- Prins, R. A. et Clarke, R. T. J. 1980. Microbial ecology of the rumen. Digestive physiology and metabolism in ruminants. (Proc. 5th Internat. Symp., Clermont-Ferrand, 3-7 Sept. 1979.). Ed. Y. Ruckebusch et P. Thivend. Lancaster UK, MTP Press Ltd.: 179-204.
- Provenza, F. D. 1995. Role of learning in food preferences of ruminants: Greenhalgh and Reid revisited. Ruminant physiology: digestion, metabolism, growth and reproduction. 8th internal symposium on ruminant physiology. 233-247.
- Putnam, D. E., Schwab, C. G., Socha, M. T., Whitehouse, N. L., Kierstead, N. A. et Garthwaite, B. D. 1997. Effect of yeast culture in the diets of early lactation dairy cows on ruminal fermentation and passage of nitrogen fractions and amino acids to the small intestine. *J. Dairy Sci.* 80: 374-384.
- Quigley, J. D., III, Wallis, L. B., Dowlen, H. H. et Heitmann, R. N. 1992. Sodium bicarbonate and yeast culture effects on ruminal fermentation, growth, and intake in dairy calves. *J. Dairy Sci.* 75: 3531-3538.
- Quinonez, J. A., Bush, L. J., Nalsen, T. et Adams, G. D. 1988. Effect of yeast culture on intake and production of dairy cows fed high wheat rations. Animal Science Research Report. Agricultural Experiment Station, Oklahoma State University
- Ragsdale, A. C. et Turner, C. W. 1923. The Effects of Underfeeding on Milk Secretion. *J. Dairy Sci.* 6: 251-260.
- Rémond, B., Brugère, H., Poncet, C. et Baumont, R. 1995. Le contenu du réticulo-rumen. Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion. Ed. Y. R. R Jarrige, C Demarquilly, MH Farce and M Journet. (Nutrition of domestic ruminants: ingestion and digestion), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris, France.: 253-298.
- Roa, V. M. L., Barcena-Gama, J. R., Gonzalez, M. S., Mendoza, M. G., Ortega, C. M. E. et Garcia, B. C. 1997. Effect of fiber source and a yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* 1026) on digestion and the environment in the rumen of cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 64: 327-336.
- Robinson, P. H. 1997. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on adaptation of cows to diets postpartum. *J. Dairy Sci.* 80: 1119-1125.
- Robinson, P. H. et Garrett, J. E. 1999. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on adaptation of cows to postpartum diets and on lactational performance. *J. Anim. Sci.* 77: 988-999.
- Robinson, P. H. 2002. Yeast products for growing and lactating dairy cattle: impacts on rumen fermentation and performance. XII International Meeting on milk and meat production in hot climates, Mexicali, Mexico, 3-4 october 2002. 12 p.
- Rook, J. A. F., Storey, J. E. et Wheelock, J. V. 1965. Plasma Glucose and Acetate and Milk

- Secretion in the Ruminant. *J. Dairy Sci.* 48: 745-747.
- Rustomo, B., Cant, J. P., Fan, M. Z., Duffield, T. F., Odongo, N. E. et McBride, B. W. 2006. Acidogenic value of feeds. I. The relationship between the acidogenic value of feeds and in vitro ruminal pH changes. *Can. J. Anim. Sci.* 86: 109-117.
- Sauvant, D. 1994. Modelling homeostatic and homeorhetic regulations in lactating animals. *Livest. Prod. Sci.* 39: 105-113.
- Sauvant, D. et Van Milgen, J. 1995. Dynamic aspects of carbohydrate and protein breakdown and the associated microbial matter synthesis. Ruminant physiology: digestion, metabolism, growth and reproduction. Proceedings 8th International Symposium on Ruminant Physiology. Ed. W. Von Engelhardt, S. Leonhard-Marek, G. Breves et D. Giesecke. Albany Germany, Delmar Publishers: 71-91.
- Sauvant, D., Baumont, R. et Faverdin, P. 1996. Development of a mechanistic model of intake and chewing activities of sheep. *J. Anim. Sci.* 74: 2785-2802.
- Sauvant, D., Meschy, F. et Mertens, D. 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *Prod. Anim.* 12: 49-60.
- Sauvant, D. 2000. Granulométrie des rations et nutrition du ruminant. *Prod. Anim.* 13: 99-108.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S. et Schmidely, P. 2004. Rumen acidosis: modeling ruminant response to yeast culture. Alltech's 20th Annual Symposium on Biotechnology in the Feed Industry. Re-imagining the feed industry. Ed. T. P. Lyons et K. A. Jacques, Nottingham University Press: 221-229.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S. et Meschy, F. 2006. Le contrôle de l'acidose ruminale latente. *Prod. Anim.* 19: 69-78.
- Schwartzkopf-Genswein, K. S. et Gibb, D. J. 2000. Bunk management affects feeding behaviour and intake. *Southern Alberta beef review* 2 (1).
- Schwartzkopf-Genswein, K. S., Beauchemin, K. A., Gibb, D. J., Crews, D. H., Hickman, D. D., Streeter, M. et McAllister, T. A. 2003. Effect of bunk management on feeding behavior, ruminal acidosis and performance of feedlot cattle: a review. *J. Anim. Sci.* 81 (E, Suppl. 2): E149-E158.
- Schwartzkopf-Genswein, K. S., Beauchemin, K. A., McAllister, T. A., Gibb, D. J., Streeter, M. et Kennedy, A. D. 2004. Effect of feed delivery fluctuations and feeding time on ruminal acidosis, growth performance, and feeding behaviour of feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 82: 3357-3365.
- Soder, K. J. et Holden, L. A. 1999. Dry matter intake and milk yield and composition of cows fed yeast prepartum and postpartum. *J. Dairy Sci.* 82: 605-610.
- Soto-Navarro, S. A., Krehbiel, C. R., Duff, G. C., Galyean, M. L., Brown, M. S. et Steiner, R. L. 2000. Influence of feed intake fluctuation and frequency of feeding on nutrient digestion, digesta kinetics, and ruminal fermentation profiles in limit-fed steers. *J.*

- Anim. Sci. 78: 2215-2222.
- Swartz, D. L., Muller, L. D., Rogers, G. W. et Varga, G. A. 1994. Effect of yeast cultures on performance of lactating dairy cows: a field study. *J. Dairy Sci.* 77: 3073-3080.
- Tremere, A. W., Merrill, W. G. et Loosli, J. K. 1968. Adaptation to high concentrate feeding as related to acidosis and digestive disturbances in dairy heifers. *J. Dairy Sci.* 51: 1065-1072.
- Uhart, B. A. et Carroll, F. D. 1967. Acidosis in beef steers. *J. Anim. Sci.* 26: 1195-1198.
- Van Soest, P. J. et Wine, R. H. 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 50: 50-55.
- Wang, Z., Eastridge, M. L. et Qiu, X. 2001. Effects of forage neutral detergent fiber and yeast culture on performance of cows during early lactation. *J. Dairy Sci.* 84: 204-212.
- Watkins, R. M. 1993. Are yeast cultures effective in dairy goat feeds? *Feed Manage.* 44: 7-13.
- Welch, J. G. et Smith, A. M. 1971. Physical stimulation of rumination activity. *J. Anim. Sci.* 33: 1118-1123.
- Welch, J. G. 1982. Rumination, particle size and passage from the rumen. *J. Anim. Sci.* 54: 885-894.
- Wiedmeier, R. D., Arambel, M. J. et Walters, J. L. 1987. Effect of yeast culture and *Aspergillus oryzae* fermentation extract on ruminal characteristics and nutrient digestibility. *J. Dairy Sci.* 70: 2063-2068.
- Williams, P. E., Tait, C. A., Innes, G. M. et Newbold, C. J. 1991. Effects of the inclusion of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae* plus growth medium) in the diet of dairy cows on milk yield and forage degradation and fermentation patterns in the rumen of steers. *J. Anim. Sci.* 69: 3016-3026.
- Wohlt, J. E., Finkelstein, A. D. et Chung, C. H. 1991. Yeast culture to improve intake, nutrient digestibility, and performance by dairy cattle during early lactation. *J. Dairy Sci.* 74: 1395-1400.
- Wohlt, J. E., Corcione, T. T. et Zajac, P. K. 1998. Effect of yeast on feed intake and performance of cows fed diets based on corn silage during early lactation. *J. Dairy Sci.* 81: 1345-1352.
- Yang, W. Z. et Beauchemin, K. A. 2006. Physically effective fiber: method of determination and effects on chewing, ruminal acidosis, and digestion by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89: 2618-2633.
- Yeates, M. P., Tolcamp, B. J. et Kyriazakis, I. 2002. The relationship between meal composition and long-term diet choice. *J. Anim. Sci.* 80: 3165-3178.
- Yoon, I. K. et Stern, M. D. 1996. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aspergillus oryzae* cultures on ruminal fermentation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 79: 411-417.

ANNEXES

Annexe 1 : Contraintes méthodologiques et conséquences analytiques

Ce travail a fait l'objet de plusieurs mises au point méthodologiques afin de maximiser le nombre de paramètres mesurés, mais également, la fréquence de mesure de certains paramètres pour les animaux canulés du rumen.

Particularités du travail avec des chèvres

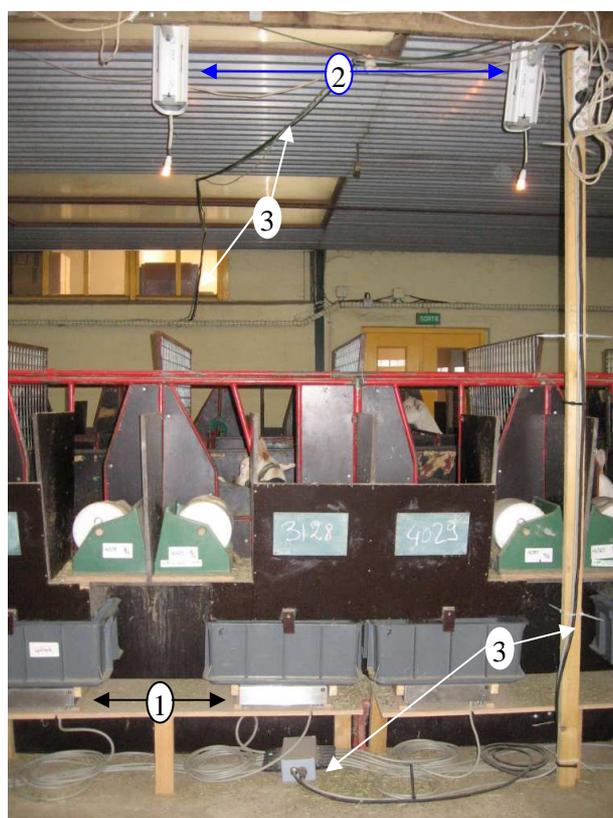
Toutes les mesures ont été réalisées sur des chèvres adultes en lactation. Or, les chèvres sont des animaux très vifs et agiles, et qui ont pour habitude de « goûter » et de mastiquer tout ce qui est nouveau dans leur environnement. Les mesures en continu de l'ingestion par des balances situées sous les bacs d'alimentation, du pH ruminal par des sondes intra-ruminales, de la mastication par la mesure du mouvement des mâchoires et du budget temps par des enregistrements vidéos ont été réalisées tout au long des expériences. Le matériel utilisé a donc dû être adapté au comportement particulier des chèvres.

Les animaux étaient en cases individuelles, ce qui permettait déjà de limiter les contacts entre eux. Les cases individuelles étaient séparées par des barreaux qui ont été recouverts par des tapis en caoutchouc jusqu'à environ 1m du sol afin d'éviter que les animaux canulés du rumen ne s'accrochent la canule dans les barreaux. Des grilles ont été rajoutées au-dessus de ces parois afin de limiter au maximum la possibilité, pour une chèvre, d'abîmer le matériel porté par ses voisines (photographie 1). Les chèvres étant des animaux grégaires qui ont besoin de contacts avec leurs congénères, elles pouvaient se voir et se sentir à travers les grilles, et se toucher au niveau de l'abreuvoir (1 pour 2 cases) ou à l'une des extrémités de la case. Elles étaient, de plus, lâchées en groupe pour aller et revenir de la salle de traite.

Les balances mesurant la quantité d'aliment restant dans chaque bac étaient placées sous les bacs d'alimentation, de façon à ce que l'animal ne puisse pas y accéder. Les informations issues des balances étaient envoyées, à pas de temps régulier, à un ordinateur situé dans une salle adjacente. Le logiciel associé ne pouvant pas stocker une quantité très importante de données, une sauvegarde était réalisée tous les 3 à 4 jours. Tous les câbles provenant des balances ou des caméras étaient regroupés, fixés hors d'atteinte des chèvres et aboutissaient à la salle adjacente où se trouvait le matériel d'enregistrement (ordinateur, magnéscope, écran de contrôle...) (photographie 2).



Photographie 1. Aménagement des cases individuelles. 1 : tapis en caoutchouc évitant aux animaux d'accrocher leurs canules dans les barreaux séparant deux cases ; 2 : grille pour éviter aux chèvres de se détériorer mutuellement les appareils de mesure ; 3 : abreuvoir ; 4 : auge ; 5 pierre à lécher ; 6 : porte.



Photographie 2. Systèmes de balances (1), caméras (2), et câbles dirigés vers une salle adjacente sans être accessibles aux chèvres (3)

Au niveau individuel, les appareils de mesure en continu portés par chaque animal ont été placés dans les poches d'une couverture, spécialement conçue pour ces expériences, et individuellement ajustée à l'animal pour ne pas le blesser (photographie 3). Cette couverture couvrait le dos, les flancs et le poitrail des animaux. Elle était fermée par une bande auto-agrippante de type Velcro au niveau du poitrail, et maintenue en place par une sangle ventrale large et élastique (également fermée par une bande auto-agrippante de type Velcro), et deux sangles élastiques plus fines au niveau des pattes postérieures. Cette couverture était aisément retirée après ouverture des bandes auto-agrippantes, et passage des pattes postérieures dans les sangles élastiques. Les animaux avaient donc accès à la couverture, mais ne pouvaient normalement pas accéder aux poches, également fermées par des bandes auto-agrippantes de type Velcro. Le câble provenant de la sonde de pH ruminale était relié au boîtier enregistreur situé dans une des poches par un petit trou à l'intérieur de la poche. Aucun câble n'était donc, normalement, accessible aux chèvres. Le tuyau transmettant les signaux de mastication provenant du licol était maintenu le plus près possible de la tête et de l'encolure, grâce à un collier, puis de l'épaule de l'animal, et était également relié au boîtier enregistreur par un trou dans la couverture afin de minimiser au maximum la surface accessible à la chèvre.



Photographie 3. Chèvre portant sa couverture et l'appareil de mesure de la mastication

Malgré toutes ces précautions, des chèvres parvenaient à se retirer mutuellement les appareils de mesure, en particulier au moment de la traite ou au niveau du passage sous la grille permettant aux animaux d'accéder à l'abreuvoir (photographie 4). De plus, certaines chèvres, au fur et à mesure de l'expérience, ont abîmé leurs couvertures, rendant les fils ou les boîtiers accessibles, malgré les quelques couvertures de rechange et les réparations effectuées régulièrement. Certaines chèvres ont également appris à soulever leur couverture (photo 4) pour atteindre le fil de la sonde de pH, ou à retirer leur licol, ou le tuyau transmettant les signaux de mastication en se frottant contre la paroi de leur case.



Photographie 4. Photographies issues des enregistrements vidéo montrant une chèvre retirant le tuyau transmetteur de sa voisine, et une chèvre retirant sa propre couverture.

L'enregistrement de paramètres en continu sur des chèvres nécessite donc une surveillance quotidienne, et une maintenance importante des appareils afin d'anticiper les détériorations, ou de réparer les appareils de mesure.

Conséquences pratiques

Tous les problèmes évoqués ci-dessus, ont entraîné de nombreuses données manquantes, du moins ponctuellement, de manière plus ou moins importante selon les chèvres. De plus, comme l'analyse devait initialement être réalisée de la distribution du soir à la distribution du soir suivante, un manque ponctuel de données pendant la nuit ou à partir de la traite du matin, ou à n'importe quel moment entre ces deux distributions, entraînait l'élimination du jour de mesure considéré. Comme la maintenance était principalement réalisée deux fois par jour au moment de la traite, de nombreuses données ont été analysées par distribution, plutôt que sur la journée complète, afin de maximiser le nombre de jours de mesure utilisables.

Enfin, certaines chèvres, malgré tous nos efforts, détérioraient systématiquement les appareils de mesure, et n'ont donc plus eu de mesures au bout de quelques semaines. Certaines chèvres ont également été légèrement blessées par leur licol ou leur couverture, et n'ont donc pas eu de mesures pendant quelque temps (généralement une semaine).

A ces problèmes dus aux chèvres, se sont ajoutés des problèmes techniques pour étalonner les sondes de pH. En effet, l'étalonnage n'était pas très stable et les sondes devaient donc être sorties du rumen régulièrement (une fois par semaine environ) pour vérifier leur étalonnage, et le refaire dans la mesure du possible. Dans le cas contraire, les sondes étaient laissées dans de l'eau distillée pendant quelque temps avant d'être à nouveau étalonnées, ou l'étalonnage était réalisé avec un autre boîtier. Le pH n'a donc pas été mesuré pendant toutes ces périodes d'étalonnage ou lorsque les sondes ne pouvaient pas être étalonnées de manière satisfaisante. Des problèmes techniques ont également été rencontrés avec les APECs (appareils portatifs pour l'étude du comportement) (Brun *et al.*, 1984) mesurant la mastication, car, d'une part, les capteurs sont relativement fragiles, et, d'autre part, il est parfois difficile de s'assurer que l'appareil enregistre et/ou capte malgré les diodes témoins. Enfin, la mémoire de ces appareils ne peut fonctionner sans piles, et donc, une usure prématurée des piles entraîne systématiquement une perte de toutes les données présentes dans le boîtier. Les appareils de mesure disponibles et fonctionnels étaient répartis entre les animaux des deux lots chaque jour pour les APECs et tous les 2 ou 3 jours pour les sondes, afin de maximiser l'équilibre des mesures entre les deux lots. Seule, une chèvre qui coupait systématiquement sa sonde de pH, n'a plus eu de mesures au bout de quelques semaines.

Le nombre de mesures disponibles pour l'analyse était donc variable selon les paramètres, les jours ou les semaines de mesure, mais également selon les animaux. Pour les 12 chèvres canulées, les mesures disponibles pour les sondes et les APECS représentent en moyenne 30 % de la totalité des jours expérimentaux (111 jours * 12 chèvres). Les deux types de mesure ne sont, cependant, pas forcément disponibles les mêmes jours. Certains animaux sont beaucoup plus représentés que les autres, tandis que d'autres sont préférentiellement représentés en début ou en fin d'expérience, ce qui pourrait avoir biaisé les résultats. De plus, certaines analyses utilisant simultanément plusieurs paramètres ont finalement été réalisées sur beaucoup moins de données que ce qui était prévu, et leurs résultats sont donc à interpréter avec précaution et seront à confirmer par d'autres expériences. Il semble cependant difficile, pour des expériences futures de réaliser ce type de mesure en continu sur des groupes plus

importants de chèvres. Il faudrait donc réussir à encore améliorer la protection des appareils et leur fiabilité.

Malgré les nombreuses difficultés techniques rencontrées, ces méthodes d'enregistrement en continu permettent d'obtenir des données très précises sur les évolutions simultanées des paramètres au cours de la journée, et donc sur les relations pouvant exister entre différents paramètres.

Brun, J. P., Prache, S. et Béchet, G. 1984. A portable device for eating behaviour studies. 5th european grazing workshop, Edimbourg, UK. 1-8.

Annexe 2 : Ethogramme utilisé pour l'analyse du budget-temps

État, Événement,

Position :

Debout : la chèvre est debout sur ses 4 pattes.

Couchée : la chèvre est couchée, son ventre repose sur le sol.

Recroquevillée : la chèvre est couchée, la tête posée sur ou contre son flanc.

Assise : la chèvre est à moitié levée, les antérieurs étant tendus et l'arrière train sur le sol.

Grimpe : la chèvre est dressée sur ses postérieurs, les antérieurs sur le bord de la case.

Absente : la chèvre n'est pas dans sa case (lors de la traite, pesée...).

Activité :

Mange : la chèvre mâche au dessus de son bac ou semble prendre de l'aliment dans son bac d'alimentation.

Rumine : la chèvre rumine, quelle que soit sa position : mouvement régulier des mâchoires sans prélèvement préalable d'aliment dans le bac d'alimentation.

Boit : la chèvre semble boire, le nez dans l'abreuvoir.

Lèche sel : la chèvre lèche sa pierre à lécher.

Repos : la chèvre est immobile et semble ne rien faire de particulier quelle que soit sa position.

Interaction sociale : la chèvre interagit avec un congénère.

Flaire environnement : la chèvre flaire ou semble s'intéresser à l'intérieur de sa case ou de sa mangeoire lorsqu'il n'y a pas d'aliment.

Mordille environnement : la chèvre mordille ou lèche le bord de sa case ou le grillage ou l'abreuvoir.

Observation : la chèvre est très attentive à l'activité régnant en dehors de sa case (oreilles dressées, mouvement de tête...).

Grooming : la chèvre se gratte sur le bord de sa case ou avec un postérieur, se lèche...

Placement : la chèvre marche (au moins deux pas) ou fait demi tour dans sa case

Urine : la chèvre urine : position accroupie caractéristique.

Défèque : la chèvre défèque.

Manipulateur : la chèvre est manipulée par quelqu'un.

Repas matin : distribution du matin.

Repas soir : distribution du soir.

Levures : apport de levures via la canule.

Non visible : l'activité de la chèvre n'est pas identifiable.

Annexe 3 : Analyse individuelle du comportement alimentaire

Toutes les figures ont été réalisées à partir de l'ACP-A réalisée sur les durées d'ingestion et de rumination par intervalles de 20 minutes entre le repas du soir et celui du matin (chapitre 3.2).

La légende présentée Figure est valable pour toutes les autres figures

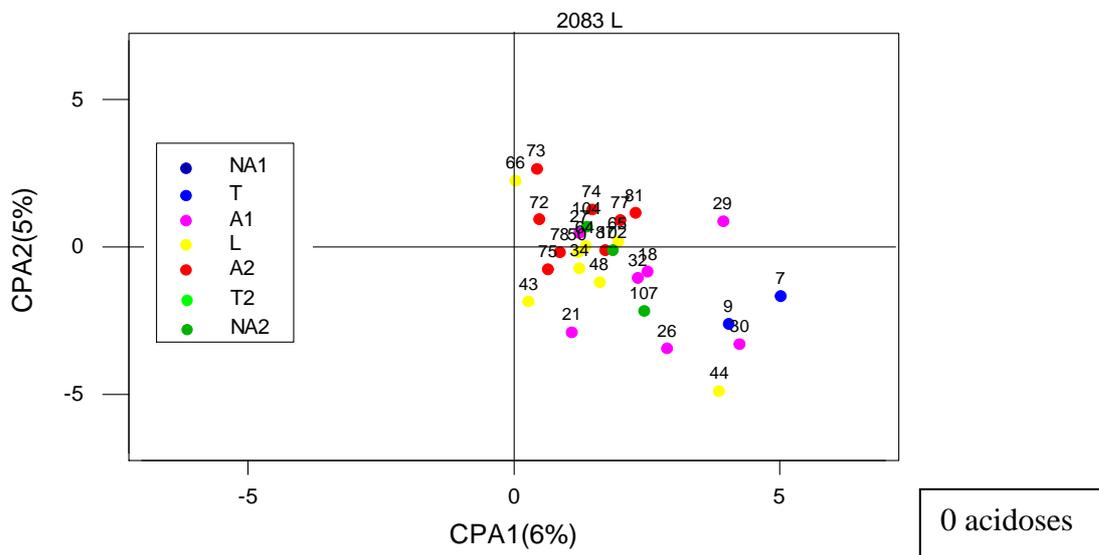


Figure 1. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 2083 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience.

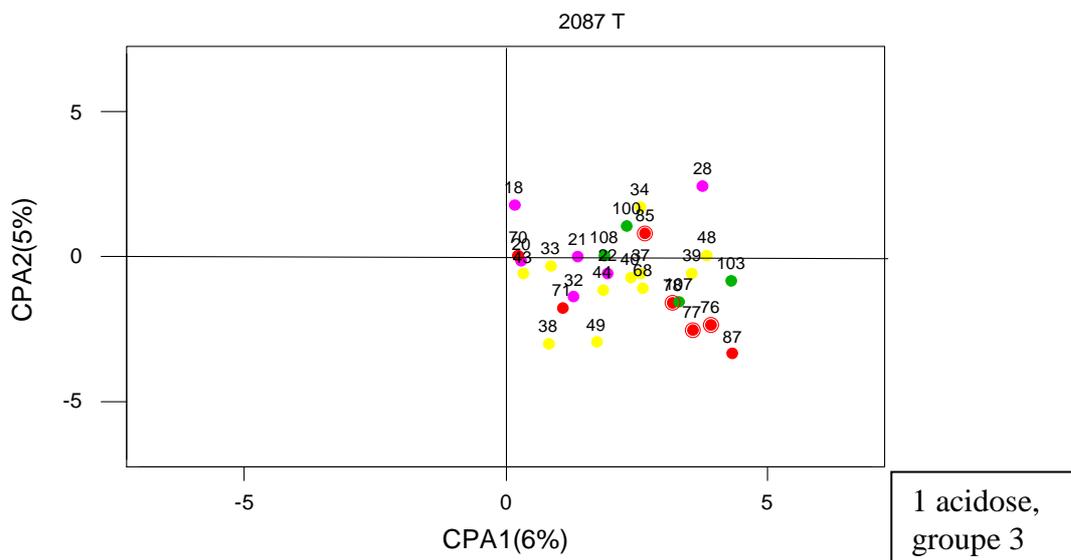


Figure 2. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 2087 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience.

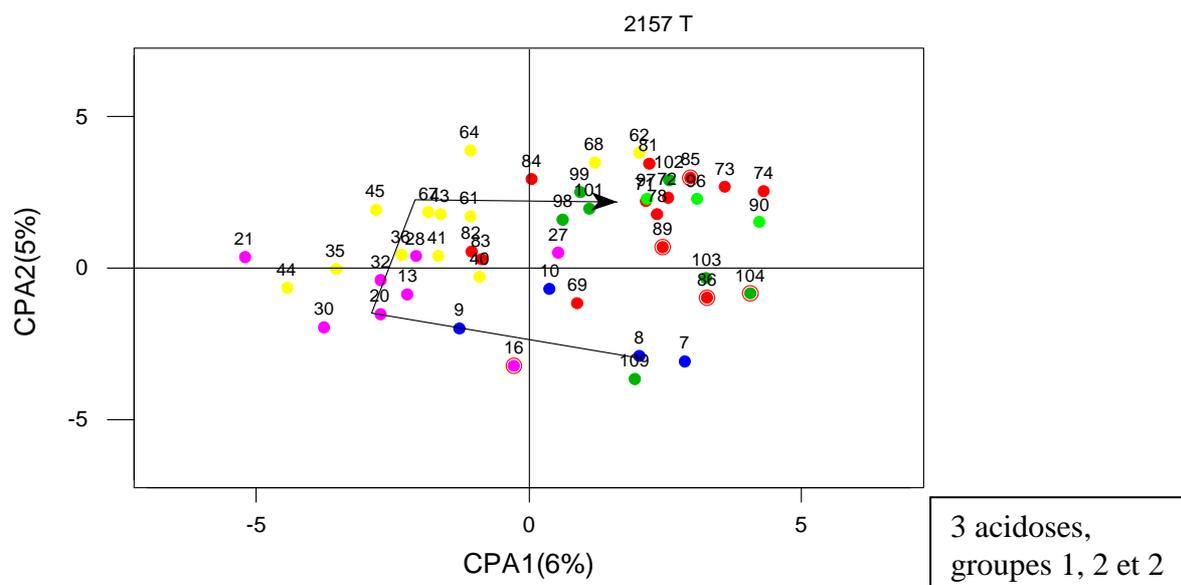


Figure 3. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 2157 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience, la flèche représente l'évolution du comportement au cours de l'expérience.

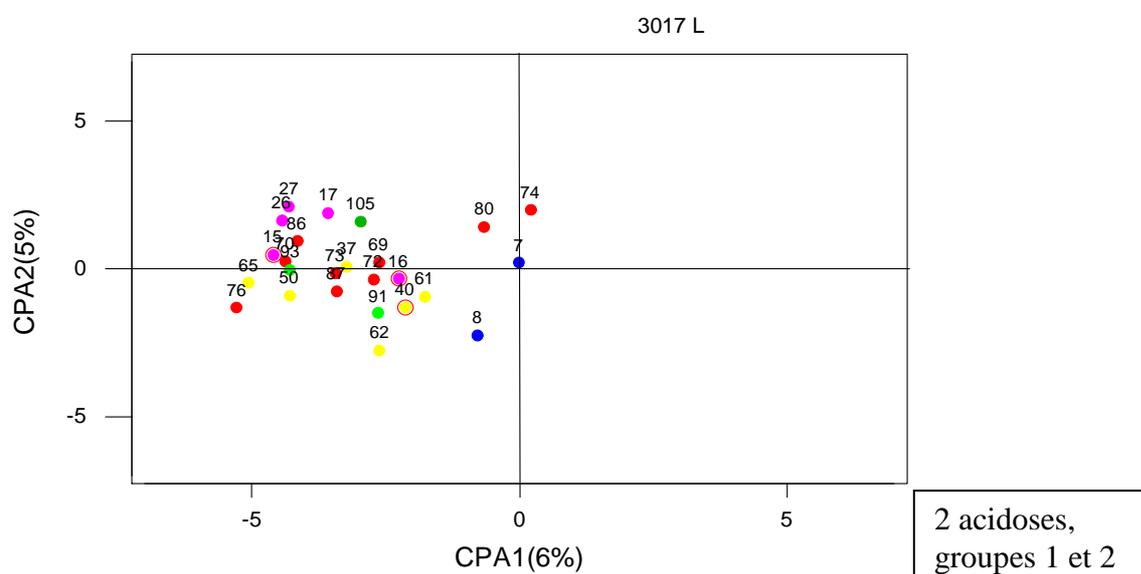


Figure 4. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 3017 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience.

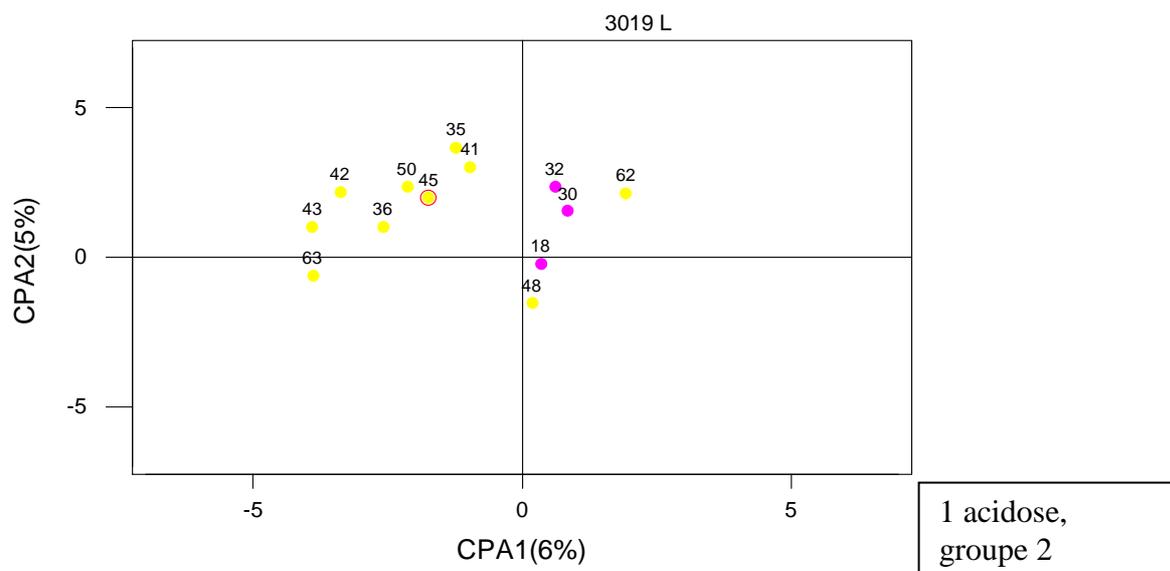


Figure 5. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 3019 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience.

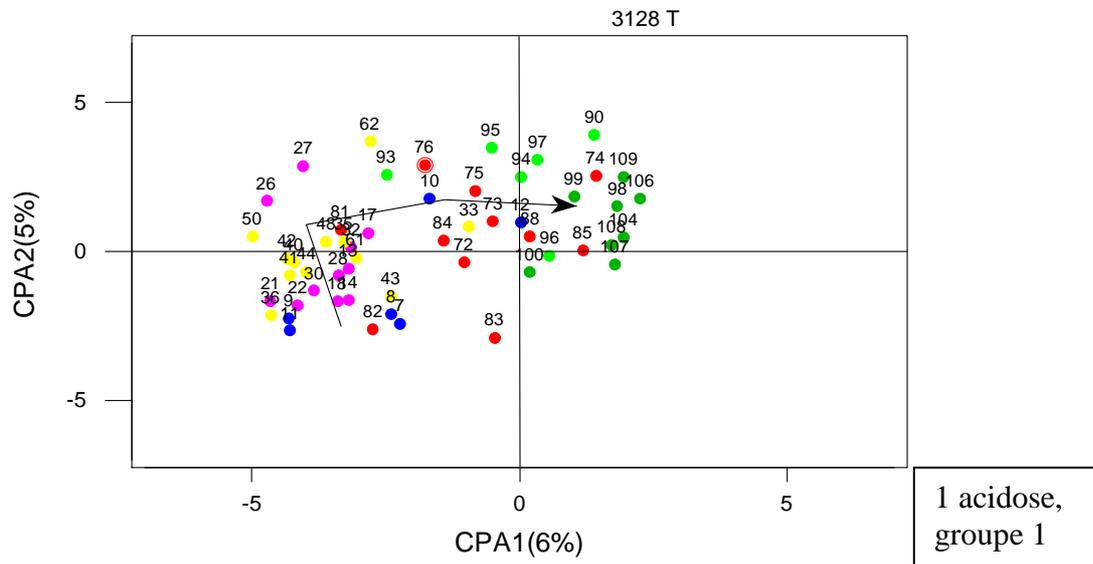


Figure 6. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 3128 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience, la flèche représente l'évolution du comportement au cours de l'expérience.

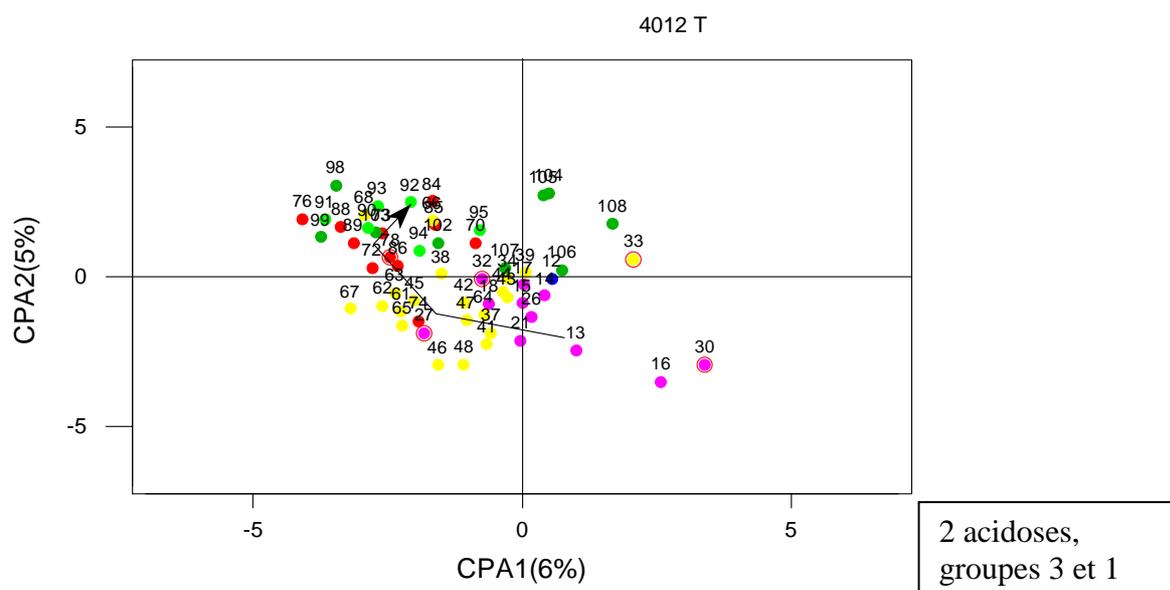


Figure 7. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 4012 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience, la flèche représente l'évolution du comportement au cours de l'expérience.

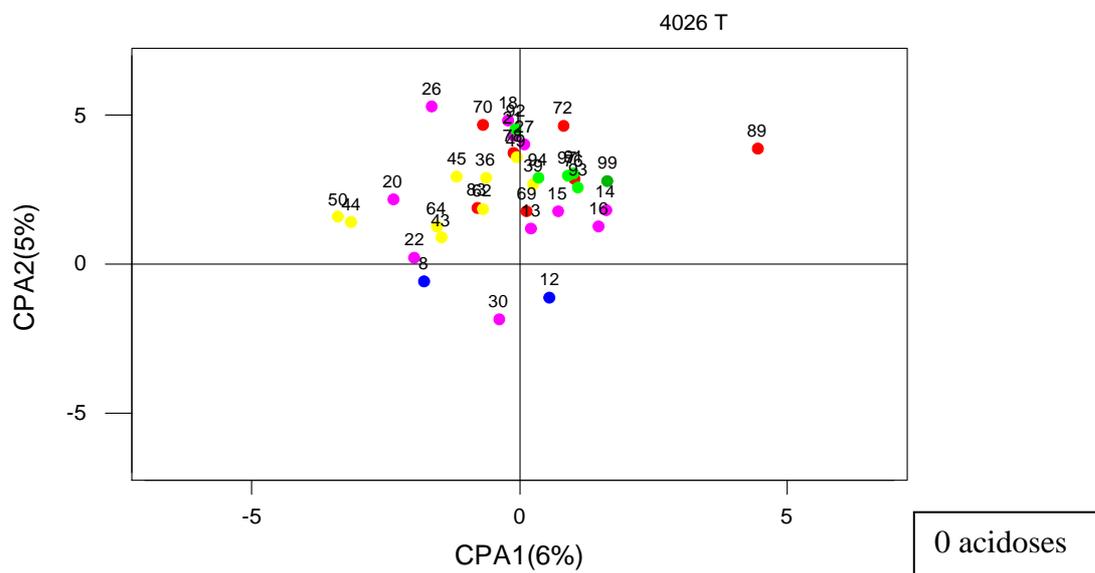


Figure 8. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 4026 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience.

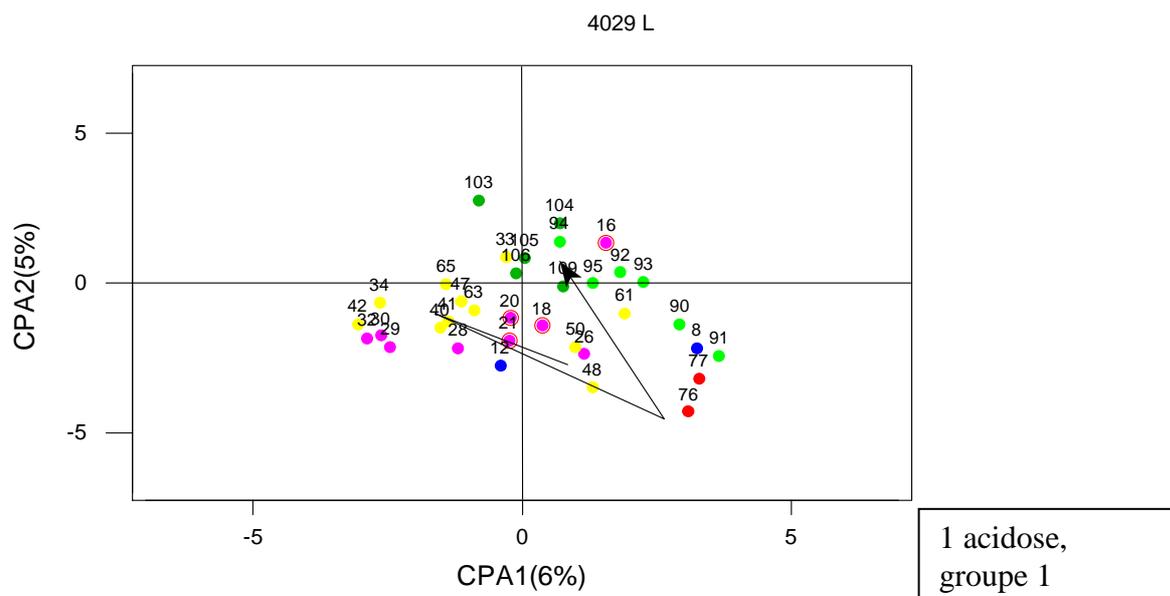


Figure 9. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 4029 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience, la flèche représente l'évolution du comportement au cours de l'expérience.

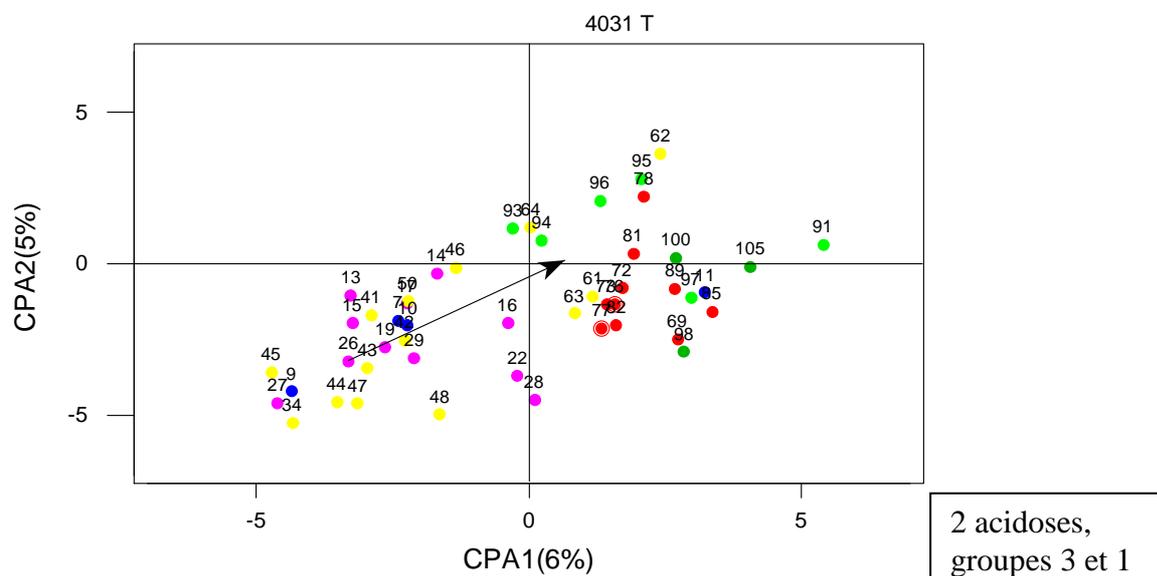


Figure 10. Projection des points « animaux-jours » de la chèvre 4031 dans le plan 1-2 de l'ACP. Nombre de crises d'acidose et intensité des crises s'il y en a eu (3 = fort, 2 = moyen et 1 = faible). Les numéros représentent le numéro de jour par rapport au début de l'expérience, la flèche représente l'évolution du comportement au cours de l'expérience.

Annexe 4 : Expérience réalisée en 2005

INTERET DE L'APPORT D'UNE LEVURE (*Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94, Alltech) SUR LA SUSCEPTIBILITE A L'ACIDOSE ET LE BIEN-ETRE DE LA CHEVRE LAITIERE

Desnoyers M.¹, Duvaux-Ponter C.¹, Roussel S.¹, Bertin G.², Tessier J.¹, Piquere P.¹ et Giger-Reverdin S.¹
¹UMR INA P-G INRA Physiologie de la Nutrition et Alimentation 16 rue Claude Bernard 75005 Paris
²ALLTECH Reg. Dept. 14, Place Marie-Jeanne Bassot 92300 Levallois-Perret

Introduction :

L'acidose sub-clinique (chute du pH ruminal) :

- Est une maladie de plus en plus présente en élevage laitier intensif
- Pourrait être réduite par l'apport de levures

Objectifs : déterminer les effets d'une supplémentation en levures sur :

- les performances zootechniques
- des paramètres ruminiaux et sanguins
- des paramètres comportementaux

Matériel et Méthodes :

- 8 chèvres fistulées du rumen
- Régime acidogène (50% de concentré)
- Levures (L, 10 g/j de *Saccharomyces cerevisiae*, CBS 493.94; $6,6 \times 10^9$ CFU/g) vs Témoins (T)



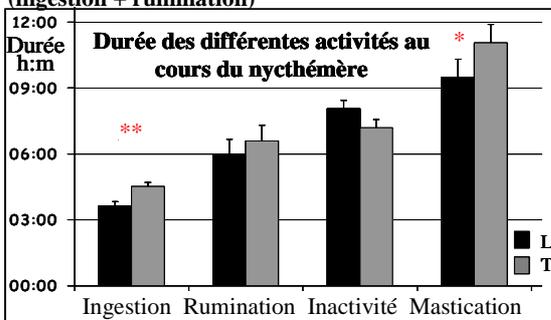
Résultats et discussion

- Pas d'influence des levures sur la MSI, la production laitière, la composition du lait
- % de temps passé sous un seuil de pH ruminal 5,5 inférieur (L = $2 \pm 1,5$ et T = $6 \pm 1,4$; $P < 0,05$)

⇒ Diminution des risques d'acidose

MAIS très grande variabilité individuelle des paramètres ruminiaux et sanguins

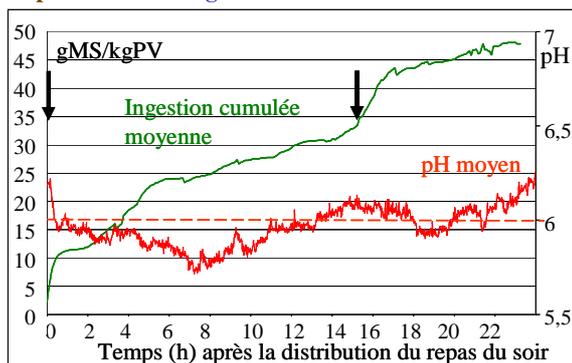
- Durée des cycles méryciques supérieure (L = $55 \pm 4,7$ min et T = $48 \pm 4,7$ min ; $P < 0,01$)
- Nombre de repas secondaires inférieur le soir (L = $4 \pm 0,2$ et T = $5 \pm 0,3$; $P < 0,05$)
- Durées d'ingestion et de mastication inférieures (ingestion + rumination)



* $P < 0,05$ ** $P < 0,01$

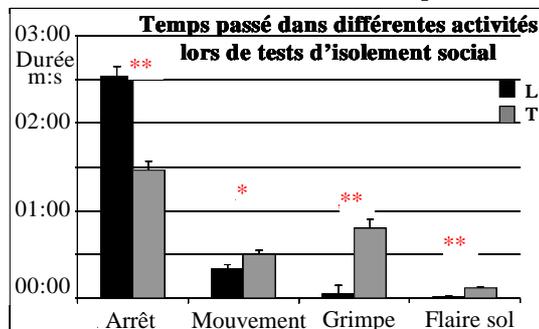
⇒ Modification du comportement alimentaire

• pH ruminal et ingestion sont très liés :



⇒ La modification du comportement alimentaire peut donc être une cause, comme une conséquence de la modification du pH ruminal.

- Modification de la réactivité émotionnelle en situation d'isolement social (3min) : moins d'activité pour le lot L



* $P < 0,05$ ** $P < 0,01$

Conclusion

- Ce travail représente une approche novatrice de la problématique en associant mesures physiologiques et comportementales.
- Dans nos conditions expérimentales l'apport de levures a limité la chute de pH ruminal et a modifié le comportement alimentaire et la réactivité émotionnelle des animaux.

Cependant une très grande variabilité individuelle est observée. Ces résultats devront donc être confirmés.

Yeast supplementation in ruminant: effects on the susceptibility to acidosis and on feeding behaviour (application to dairy goats)

Sub-clinical acidosis is poorly detected and is not easily prevented in intensive herds because it is mainly characterized by instability of intake, production and rumen parameters. A meta-analysis performed on 110 papers showed that yeast supplementation can stabilize rumen fermentations, especially in animals with high intake levels and fed high concentrate diets.

Feeding a high concentrate diet led to subclinical acidosis ($\text{pH} < 6.25$), and a variable number of spontaneous bouts of acidosis depending on the goat. These acidosis bouts could influence milk production during several weeks. Daily measurements of rumen pH, intake and milk production were used to model the day-to-day evolution of these parameters during bouts of acidosis. This model is a first step towards a more mechanistic model of sub-clinical acidosis.

Several methodologies were developed in order to simultaneously and continuously record intake, rumen pH and chewing behaviour (time scale around one minute) during several weeks. These measurements allowed to design a new method to analyse intake kinetics by segmentation / classification and to determine some typical feeding behaviours, observed whatever the offered diet, and more or less stable depending on the goat. These types of feeding behaviours lead to different rumen pH kinetics despite a similar daily intake. Bouts of acidosis were characterized by a very low intake and a diminution in nycthemeral organisation of feeding behaviour. However, no relationship was found between feeding behaviour variability and goat susceptibility to acidosis.

Taking the bouts of acidosis into account for the analyses of yeast supplementation effects allowed to avoid confounding effects. Yeast supplementation increased milk yield without influencing dry matter intake or milk fat and protein production. This might have been due to the higher sorting behaviour performed by supplemented goats which allowed them to eat a less fibrous diet than the one eaten by control goats. Yeast supplementation tended to increase ruminal biodiversity, which might explain the fact that the decrease in the percentage of fibre ingested by supplemented goats compared to control goats did not influence rumen pH.

This study showed that spontaneous bouts of acidosis can lead to many drastic consequences and showed the relevance of analysing feeding behaviour in order to better understand the modifications in digestive or metabolic parameters.

Keywords: acidosis, yeast supplementation, *Saccharomyces cerevisiae*, feeding behaviour, time-budget, dairy goat