



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/Eprints> ID : 11298

To cite this version :

Boyé, Marlène. *Etude in sacco de la dégradation ruminale des fibres et des matières azotées de fourrages fertilisés avec du fumier traité ou non par du Bactériolit*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse - ENVT, 2014, 106 p.

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr.

ETUDE IN SACCO DE LA DÉGRADATION RUMINALE DES FIBRES ET DES MATIÈRES AZOTÉES DE FOURRAGES FERTILISÉS AVEC DU FUMIER TRAITÉ OU NON PAR DU BACTERIOLIT®

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

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

par

BOYE Marlène

Née, le 28 juin 1987 à Villefranche-de-Rouergue (12)

Directeur de thèse : M. Francis ENJALBERT

JURY

PRESIDENT :
M. Robert SALVAYRE

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
M. Francis ENJALBERT
M. Renaud MAILLARD

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

Directeur : M. Alain MILON

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les Industries agro-alimentaires*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
- M. **MARTINEAU Guy**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
- M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*
- M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

PROFESSEURS 1° CLASSE

- M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootechne*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*

PROFESSEURS 2° CLASSE

- Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*
- M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

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

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- Mlle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
- M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*

MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
- Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
- Mlle **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
- Mme **BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
- Mlle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*
- M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
- M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
- M. **CUEVAS RAMOS Gabriel**, *Chirurgie Equine*
- Mme **DANIELS Hélène**, *Microbiologie-Pathologie infectieuse*
- M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- Mlle **FERRAN Aude**, *Physiologie*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Elevage et Santé avicoles et cunicoles*
- M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mlle **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique des animaux de rente*
- Mlle **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
- M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
- Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
- M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
- Mlle **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
- Mlle **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*
- Mme **PRADIER Sophie**, *Médecine interne des équidés*
- M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales (ruminants)*
- Mme **TROEGELER-MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
- M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie (disponibilité à cpt du 01/09/10)*
- M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*
- Mme **WARET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

MAITRES DE CONFERENCES et AGENTS CONTRACTUELS

- M. **BOURRET Vincent**, *Microbiologie et infectiologie*
- Mme **FERNANDEZ Laura**, *Pathologie de la reproduction*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- Mlle **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
- M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie*

REMERCIEMENTS

A notre Président de thèse,

Monsieur le Professeur Robert SALVAYRE

Professeur des Universités

Chef de service de laboratoire de Biochimie

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

Hommage respectueux.

A notre jury de thèse,

Monsieur le Professeur Francis ENJALBERT

Professeur à l'école vétérinaire de Toulouse

Alimentation

Qui a accepté d'encadrer

Pour son aide et sa disponibilité

Qu'il trouve ici le témoignage de notre reconnaissance et de notre profond respect.

Monsieur le Professeur Renaud MAILLARD

Professeur à l'école nationale vétérinaire de Toulouse

Pathologie des ruminants

Qui nous a fait l'honneur de participer à notre jury de thèse

Qu'il trouve ici l'expression de toute notre gratitude

REMERCIEMENTS PERSONNELS

A Marcel MEZY,

Pour l'énergie et la passion mise en œuvre pour porter haut ses idées et les fruits de son invention, en France et dans des contrées beaucoup plus lointaines.

Qu'il trouve ici le témoignage de mon admiration et de mon respect.

A Bertrand OUDOT,

Pour avoir été l'interlocuteur de la SOBAC qui m'épaulée tout le long de la réalisation de ce travail.

Pour son aide précieuse et sa disponibilité.

A Marie-Luce CHEMIT, Jean-Philippe VERGNES et Marie-Claude NICOT,

Pour leur aide précieuse lors de la réalisation de la phase expérimentale de ce travail.

Pour leur disponibilité et leur bonne humeur.

A Thérèse VLIÉGEN-COMES,

Pour avoir transmis les fourrages et les analyses chimiques qui ont été la base du travail expérimental réalisé dans cette thèse.

Pour son aide et les réponses à mes nombreuses questions qu'elle a su m'apporter dans les plus brefs délais.

A mes parents,

Pour m'avoir transmis l'amour des animaux, et le goût de la persévérance.

Pour m'avoir aidée et soutenue dans les moments heureux comme difficiles et dans tous mes projets. Pour m'avoir présenté avec confiance mes premiers(ières) patient(es).

C'est avant tout grâce à vous si aujourd'hui je suis devenue une femme et une vétérinaire (presque) accomplie !

Je suis fière d'être votre fille, trouvez dans ces mots tout l'amour et la reconnaissance que je n'ai pas toujours su vous témoigner.

A Cédric et Aurélien,

Mes frangins mes poteaux mes copains, merci pour votre aide et votre soutien si précieux !

Pour toutes ces belles années passées à Lestanquie.

Cédric, mon modèle, merci pour avoir joué pleinement ton rôle de grand frère même quand tu étais si loin !

Aurélien, mon complice de chamailleries et autres bêtises ! Je suis de tout cœur avec toi pour les mois qui suivent et souhaite que tu puisses accéder à ce que tu désires.

A Marie-Christine et Pauline, mes belles sœurs de choc !

A mes mamies, papis, taties, tontons, cousins et cousines

Pour votre amour et votre soutien inconditionnel.

A Zac',

Pour le sourire que tu me donnes chaque jour. Pour ta patience face à toutes mes « marlénades » !!! Pour ton soutien, et pour tout le bonheur que tu m'apportes au quotidien.

A nous !

A Chachou,

Pour nos virées équestres parfois semées d'embuches et de troncs (un peu trop bas...), pour ces belles années de « coloc' » à l'internat, pour être ma complice de toujours ! A tous ces bons moments passés à la Cabanie avec **Aline**.

Aux amis du lycée, quelque peu perdus de vue mais il n'est jamais trop tard pour se retrouver !

Aux Aveyronnais

A Delfine, pour tes oreilles attentives, pour tous ces Muscatis et ces soirées très VIPiesques !

A Mélissa, a notre connerie Mila ! Nos chemins se sont un peu éloignés mais tu sais toujours trouver les mots justes !

A Audrey, ma sœurette, mon initiatrice au Pastis, pour toutes ces bonnes soirées Pétruciennes où tu sais mettre une ambiance de folie!

A Aurélie, pour toutes nos virées aveyronnaises, nos belles discussions très philosophiques assises dans le coffre d'une voiture des aubades !

A Clément C, Clément G, Olive, Peio, Maéva, Salou, Seb, Céline, Nico pour toutes ces belles bringues aveyronnaises !

A tous les autres Pétruciens, que notre fête si précieuse à nos yeux perdure encore longtemps !

PS : pour ceux qui ne connaissent pas encore, ça se passe le premier week-end de septembre à Peyrusse-le-Roc(k)

A Karine et Christophe,

Pour toutes nos virées à ch'val ! Merci d'avoir pris soin d'Under.

A Clémence et Arantxa,

Pour les aventures fabuleuses du G3 ! Pour cette super année passée dans le Donjon, je suis prête à recommencer la coloc' quand vous voulez !

Pour mes Boulets préférés : **Charlotte, Florent, Yohann, Arantxa, Clémence**

Qu'on arrive à se retrouver (et à retrouver notre esprit d'ados attardé) aussi souvent que possible avant la maison de retraite (d'ailleurs on la réserve où ? on devrait commencer un doodle...) !

A Jennifer, ma grande sœur toulousaine, pour ton écoute et tes conseils.

Aux Toulousains zinzins : Philippe, Yoann, Xavier, Cyril, Emilie, Bertrand, Sarah, Mari-Laure, Thierry

Pour ces bons moments passés ensemble, pour ces super soirées toulousaines, et pour tous nos voyages. Canada, Pérou, Bolivie, Cambodge,... au fait, c'est quand qu'on va où ?!

Aux vétos :

A Marion,

Mais qui est cette fille qui dort dans le coffre de sa voiture à Vic ?! Mais oui c'était bien toi, ma commère de toutes ces années vétos !!! Merci pour ton écoute attentive, pour nos débriefings sushis, nos « pauses » Breaking Bad, pour les craquages au chocolat noir côte d'or aux pistaches caramélisées, pour le Puertotage et autres sorties Cuba Libresques, pour les mojitos et le guacamole !

A Mattias,

A quand notre concert de Meuhkulélés !? Pour ta bonne humeur, ton rire satanique et tes dessins géniaux !

A Joséphine,

La plus sexy des Pink Panthères ! Pour nos aventures en 4L. Prête pour le Rallye des Gazelles ?

A Vicky,

Pour avoir un œil avisé, pour ta claaaaassssitude et pour être toujours partante pour aller festoyer !!!

A MAV,

Pour toutes ces aventures avec les 4 matastiques, pour ton courage inébranlable face à un chat fou, pour ta Salsa fever !

A Val, Agnès, Philou, Francis et Francis, Tibor, Bla, Charlotte J, Maud, Margue, Léa, Alex, Maxime, Nico, Riblotte, ... A mes **Docteurs**, à mes **Poulots**. Et à tous les autres, merci pour ces 5 belles années !

A la **team opthalgo** de l'ENVT, merci pour tout ce riche apprentissage et pour la bonne humeur qui règne tous les jours ! Cette année est en train de passer à toute vitesse, je suis heureuse d'appartenir à la « brigade ophtalmique » !

A Monsieur le Professeur Alain Regnier, pour la passion dont vous faites preuve pour nous transmettre le « virus » de l'ophtalmologie, pour tout ce précieux savoir que vous savez nous délivrer chaque jour avec talent, pour votre patience et votre gentillesse.

A tous les Confrères qui m'ont appris énormément de choses et m'ont transmis l'amour du métier lors de mes stages. Et à ceux qui m'ont fait confiance pour de premières expériences professionnelles : **Charlotte Van Hoyer, Thibault Lefort, Patrick Grouiller, Bernard Loisy, Valérie Leclerc, Philippe Portero, Daniel Phaneuf, Richard Bourassa, Sylvain Brosse, Mathieu Lenormand, Serge Lenormand, Elodie Combeau, Eric Jacob, Virginie de Ceuster, Isabelle et Bernard Avril.**

A ceux et celles que je ne cite pas mais qui demeurent dans mon cœur.

A tous mes anciens amis à 4 pattes : **Lola, Lassie, Chocolat, Choupie, Elsa, Gypsie, Gitane, Chico, Lucie, ...**

A mes deux « dinosaures » préférés : **Under et Guard.**



La décomposition et la formation de la matière organique du sol à travers le regard d'un chien (Schulz, 1962)

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	3
---------------------	----------

Partie I : Etude bibliographique

1. Particularités digestives et besoins alimentaires des bovins 9

1.1 Particularités digestives des ruminants	9
1.1.1 La rumination	9
1.1.2 La digestion ruminale	9
1.1.3 Cinétique de dégradation ruminale des glucides et des matières azotées	11

1.2 Besoins alimentaires des bovins	15
1.2.1 Besoins énergétiques	15
1.2.2 Besoins en azote	18
1.2.3 Besoins en minéraux	22
1.2.4 Capacité d'ingestion (CI)	24

1.3 Valeur alimentaire des fourrages secs	25
1.3.1 La digestion des fourrages chez les ruminants	25
1.3.2 Valeur alimentaire des fourrages	25

2. Etude agronomique 30

2.1 Intérêts et limites de la fertilisation minérale et organique	30
2.1.1 Principe	30
2.1.2 Influence de la fertilisation minérale sur les rendements fourragers	31
2.1.3 Influence de la fertilisation minérale sur la qualité des fourrages	32
2.1.4 Les conséquences néfastes de la fertilisation minérale	37

2.2	Intérêts de la fertilisation par compost par rapport à la fertilisation minérale	38
2.2.1	Principe du compostage	38
2.2.2	Intérêts du compostage	40
2.2.3	Limites du compostage	42
2.2.4	Intérêts potentiels d'un compost traité avec des micro-organismes	42
2.2.5	Cas particulier du Bactériolit®	44

Partie II : Etude expérimentale

1. Matériels et méthodes **51**

1.1	Aliments à tester	51
1.1.1	Essai GUMIKO bis	51
1.1.2	Caractéristiques des fourrages choisis	53
1.2	Analyse chimique des fourrages : étude statistique	54
1.2.1	Données et paramètres étudiés	54
1.2.2	Analyse statistique	55
1.3	Etude in sacco	60
1.3.1	Protocole général	60
1.3.2	Dosage de la cellulose brute : méthode de Weende	61
1.3.3	Dosage de l'azote total : méthode de Dumas	63
1.3.4	Cinétique de dégradation in sacco : modèle mathématique	64

2. Résultats **66**

2.1	Allure générale des courbes de dégradation de la CB et des MAT	66
2.1.1	Allure générale de la courbe de dégradation de la CB	67
2.1.2	Allure générale de la courbe de dégradation des MAT	68
2.2	Analyse statistique	68
2.2.1	Effet Bactériolit®	69
2.2.2	Effets coupe et année	70
2.2.3	Effet vache	70

2.3	Calcul des paramètres de dégradation et modélisation mathématique	71
2.3.1	Calcul des paramètres de dégradation de la CB	71
2.3.2	Calcul des paramètres de dégradation des MAT	72
3.	Interprétation et discussion	74
3.1	Analyse chimique des fourrages	74
3.1.1	Valeurs énergétiques et protéiques	74
3.1.2	Teneur des fourrages en minéraux	74
3.2	Dégradation de la CB et des MAT	75
3.2.1	Dégradation de la CB	76
3.2.2	Dégradation des MA	77
	CONCLUSION	81
	BIBLIOGRAPHIE	85
	ANNEXES	91
1.	Plan des parcelles utilisées pour l'essai Gumiko bis	91
2.	Tableaux de résultats de l'étude in-sacco : pourcentages de CB et de MAT dégradées	92
3.	Courbes représentant la dégradation de la CB (%) en fonction du temps (h)	99
4.	Courbes représentant la dégradation des MAT (%) en fonction du temps (h)	103

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

<i>Figure 1 : Schéma résumant la dégradation des constituants organiques des aliments dans le rumen-réseau (d'après Coordination I.N.R.A.P, 1984)</i> -----	11
<i>Figure 2 : Teneur en urée du sang ou du lait en fonction du taux de NH3 ruminal (d'après Sauvart et al., 2001)</i> -----	15
<i>Figure 3 : Schéma représentant l'utilisation digestive des matières azotées chez les ruminants (Vérité & Peyraud, 1988).</i> -----	19
<i>Figure 4 : Variations de la DT avec les teneurs en MAT du fourrage conservé pour le Ray Grass anglais exploité au premier cycle de végétation, selon s'il est conservé en ensilage ou en foin (d'après Nozières et al., 2007)</i> -----	28
<i>Figure 5 : Evolution des rendements d'une prairie de fauche en fonction de niveau de fertilisation azotée (d'après Knoden et al., 2007)</i> -----	32
<i>Figure 6 : Effet du niveau de fertilisation azotée sur le rendement azoté d'un Ray Grass Italien, selon l'âge de repousse (d'après Wilman, 1975)</i> -----	33
<i>Figure 7 : Effet de l'azote sur la vitesse de croissance.</i> -----	35
<i>Figure 8 : Digestibilité des parois (NDF) de plantes adultes en fonction du temps de pousse, pour des traitements avec (N+) ou sans (N-) azote (d'après Duru et al., 2008)</i> -----	36
<i>Figure 9 : Schéma comparant le fonctionnement d'un sol avec apport de fumier composté et d'un sol avec apport de fumier composté traité par des micro-organismes</i> -----	49
<i>Figure 10: Photographie des parcelles utilisées dans l'essai Gumiko bis</i> -----	53
<i>Figure 11 : Graphique représentant les quantités de cendres obtenues pour chacune des modalités sur 4 années</i> -----	58
<i>Figure 12 : Graphique représentant les teneurs en potassium obtenues pour chacune des modalités sur 4 années</i> -----	59
<i>Figure 13 : Courbe de dégradation in sacco des constituants alimentaires dans le cas où il n'y a pas de temps de latence</i> -----	65
<i>Figure 14 : Graphique représentant les % moyens de CB dégradée (11 coupes, 3 vaches), en fonction du temps d'incubation in sacco (6, 12, 24 et 48 heures)</i> -----	67
<i>Figure 15 : Graphique représentant les % moyens de MAT dégradées (11 coupes, 3 vaches), en fonction du temps d'incubation in sacco (6, 12, 24 et 48 heures)</i> -----	68

TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Vitesse de dégradation des protides et glucides dans le rumen (d'après C. Rousseau, 2012)</i>	12
<i>Tableau 2 : Niveau de production pour différentes catégories de bovins (d'après Jarrige, 1988)</i>	16
<i>Tableau 3 : Apports recommandés en PDI pour les bovins selon leur stade physiologique (Agabriel, 2007, tables de l'INRA).</i>	22
<i>Tableau 4 : Estimation du besoin d'entretien (g/jour) en éléments minéraux majeurs absorbés (d'après Meschy, 2007), MSI : Matière Sèche Ingérée, PV : poids vif en kg</i>	22
<i>Tableau 5 : Apports recommandés en oligo-éléments et seuils de tolérance (mg/kg MS de la ration) (Meschy 2007, adapté de INRA 1988)</i>	23
<i>Tableau 6 : Récapitulatif des 15 modalités de fertilisation comparées dans l'essai GUMIKO (SOBAC, 2009)</i>	52
<i>Tableau 7 : Dénomination et quantité des échantillons de fourrages disponibles</i>	54
<i>Tableau 8 : Etude statistique des analyses chimiques des fourrages : valeur moyenne de tous les paramètres pour chaque année et p-value associée</i>	56
<i>Tableau 9 : Etude statistique des analyses chimiques des fourrages : valeur moyenne de tous les paramètres pour chaque coupe et p-value associée</i>	57
<i>Tableau 10 : Etude statistique des analyses chimiques des fourrages : valeur moyenne de tous les paramètres pour chaque modalité (témoin et Bactériolit®) et p-value associée</i>	58
<i>Tableau 11 : Ration des vaches donneuses (kg de matière brute)</i>	61
<i>Tableau 13 : % moyen de dégradation de la CB pour les temps d'incubation de 6, 12, 24 et 48h, pour les modalités témoin et Bactériolit®</i>	69
<i>Tableau 12 : Résultats de l'ANOVA concernant la dégradation de la CB (tableau du haut) et des MAT (tableau du bas) en fonction des paramètres coupe, année, vache et modalité (témoin ou Bactériolit®) pour les temps d'incubation de 6, 12, 24 et 48h.</i>	69
<i>Tableau 14 : % moyen de dégradation de la MAT pour les temps d'incubation de 6, 12, 24 et 48h, pour les modalités témoin et Bactériolit®</i>	70
<i>Tableau 15 : Résultats obtenus avec le logiciel Systat pour le calcul des paramètres de dégradation de la CB b et c, ainsi que la variation de ces paramètres due au Bactériolit® (b1 et c1)</i>	72
<i>Tableau 17 : Synthèse des constantes de dégradation in sacco obtenues pour la CB et les MAT avec des fourrages cultivés avec ou sans Bactériolit®</i>	73
<i>Tableau 16 : Résultats obtenus avec le logiciel Systat pour le calcul des paramètres de dégradation des MAT a, b et c, ainsi que la variation de ces paramètres due au Bactériolit® (a1, b1 et c1)</i>	73

INTRODUCTION

L'efficacité de la fertilisation azotée a contribué au développement d'une agriculture moderne très demandeuse en azote. Cette agriculture intensive n'est pas sans conséquences : épuisement des sols, évaporation des nitrates (risque de formation de composés gazeux participant à l'effet de serre ainsi qu'à la destruction de la couche d'ozone), lessivage des nitrates (pollution des eaux, phénomène d'eutrophisation),... Actuellement, l'inquiétude concernant ces effets néfastes sur l'environnement et les risques de toxicité pour l'homme (méthémoglobinémie aigue du nourrisson (Fan & Steinberg, 1996), effets cancérigènes) est vive. Les gouvernements et l'opinion publique sont désormais sensibilisés à ces problèmes et aspirent à une agriculture plus respectueuse de l'environnement (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Recommandation « nitrates » dans les eaux destinées à la consommation humaine, 1998). Les excès de nitrates dans l'environnement sont également observés lors d'épandage de quantités importantes de fumier ou de lisier de ferme, soumis eux aussi au phénomène de lessivage.

« Produire suffisamment et laisser fièrement une terre propre à ses successeurs », telle est la devise de Marcel Mezy, « paysan-chercheur » qui a inventé le Bacteriolit® en 1986. Ce fertilisant naturel est obtenu à partir de plusieurs composts de matières végétales. Il est composé de différentes souches choisies de micro-organismes, ainsi que d'un support de matières organiques mortes et de matières minérales. Ce produit s'incorpore à des fumiers, litières ou composts et favorise la transformation des matières organiques animales et végétales en humus. Les produits Bactériolit® et Bactériosol® ont déjà conquis 7500 exploitants agricoles en France. Ces derniers témoignent de rendements supérieurs à ceux obtenus via une fertilisation avec des engrais classiques, ce qui a été confirmé lors d'une expérimentation menée pendant 10 ans par le centre de recherche Agra-Ost (Belgique).

Des intérêts économiques pour les agriculteurs se dégagent via ces rendements satisfaisants et la diminution de l'utilisation d'intrants conventionnels (engrais chimiques, pesticides). Une étude à propos de l'effet du Bacteriolit® sur le revenu des exploitations agricoles qui l'emploient a été dirigée en 2005 par le Professeur Mazoyer au sein de l'ADEPRINA (Association pour le Développement de l'Enseignement, du Perfectionnement

et de la Recherche à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon). Elle consistait à comparer deux groupes d'éleveurs producteurs de viande bovine limousine, utilisateurs ou non du procédé, en se basant sur le calcul des rendements (de fourrages, de céréales et de viande) et des revenus obtenus, d'une part et des coûts supportés d'autre part. Chez les utilisateurs de Bacteriolit®, une augmentation de la production fourragère utile totale (+5,5%) et de la production autonome de viande (+11%) ainsi qu'une diminution des coûts et des frais pour obtenir cette production ont été mises en évidence (-3,5%). Outre les rendements fourragers plus importants, et le meilleur état de santé des animaux (les frais vétérinaires par kg de croit s'élevaient à 0,080 euros par kg pour les utilisateurs et 0,091 euros par kg pour les non utilisateurs), une hypothèse avancée pour expliquer cet accroissement de la production autonome de viande est l'amélioration de la qualité nutritionnelle de ces fourrages.

Le travail qui va suivre a pour but de comprendre l'origine de ces meilleures performances chez les bovins. Les effets sur les animaux de la fertilisation avec des fourrages traités par du Bacteriolit® (qui seront appelés fourrages Bactériolit®) et avec des fourrages témoins fertilisés par du fumier seul seront comparés.

Dans une première partie bibliographique seront rappelées les particularités digestives des ruminants ainsi que leurs besoins alimentaires. Ensuite, les enjeux de la fertilisation et les intérêts potentiels d'un compost traité avec des micro-organismes seront abordés.

Une deuxième partie traitera du travail expérimental effectué dans le cadre de cette thèse à partir de fourrages provenant du centre de recherche AGAOST (Belgique). Il sera d'abord question de l'analyse chimique de ces fourrages. Enfin sera présentée l'étude de la dégradabilité in sacco de ces fourrages, qui a eu lieu au domaine expérimental de Borret ainsi qu'au laboratoire ENVIT de l'UMR TANDEM.

Partie I : Etude bibliographique

1 Particularités digestives et besoins alimentaires des bovins

1.1 Particularités digestives des ruminants

Les ruminants sont des herbivores dits « polygastriques », leur tube digestif comprend en effet trois pré-estomacs (rumen, réseau et feuillet) précédant la caillette, réservoir qui équivaut à l'estomac des monogastriques (Coordination I.R.A.P, 1984). La digestion et l'utilisation des aliments chez les ruminants sont modifiées par rapport à celles des monogastriques grâce à l'existence de la dégradation microbienne dans les pré-estomacs.

1.1.1 La rumination

La rumination consiste en une régurgitation du bol alimentaire suivie d'une phase de mastication mérycique où les mouvements de mastication sont lents et la salivation importante. Ce phénomène permet de fragmenter les aliments et de faciliter leur digestion par les micro-organismes du tube digestif. La rumination est un réflexe déclenché par le frottement de la partie fibreuse du bol alimentaire contre la paroi du rumen. Seules des particules de grande taille permettent un stimulus efficace, le temps total passé à ruminer dépend donc du régime alimentaire : il est d'environ 8h par jour pour un bovin ingérant 8kg de foin (Vignau-Loustau & Huyghe, 2008).

1.1.2 La digestion ruminale

L'essentiel de la digestion a lieu dans le rumen qui est le plus volumineux des réservoirs (150-200L chez des bovins adultes) et contient 70 à 75% du contenu total de l'appareil digestif (Coordination I.R.A.P, 1984). La durée de rétention d'un aliment dans le rumen varie selon sa forme : environ 10 heures pour les liquides et jusqu'à 25 à 60 heures pour les solides (Remond *et al.*, 1995). Elle repose sur une relation symbiotique où les aliments sont transformés par les micro-organismes du réseau-rumen qui produisent des

« déchets » (chaleur, gaz, (méthane (CH₄), Acides Gras Volatils (AGV), ammoniac (NH₃)) dont une grande partie peut être utilisée par les ruminants, ainsi que des corps microbiens, dont une part des constituants, en particulier les protéines, sont utilisables par les animaux.

Cette population microbienne comprend des bactéries (majoritaires), des protozoaires et des champignons (peu nombreux). Les bactéries sont capables de digérer les parois végétales, de synthétiser des protéines et des vitamines (vitamines B) et de dégrader des substances toxiques (oxalates, cyanure, alcaloïdes...) (Ferrand, 2010). Plus de 200 espèces cohabitent dans le réseau-rumen, il en existe deux groupes fonctionnels principaux : les bactéries fibrolytiques et amylolytiques.

L'équilibre entre ces deux populations est essentiel pour assurer une digestion de qualité et requiert des conditions ruminales particulières : anaérobiose, $5,5 < \text{pH} < 7,3$ (optimum à 6), température de 40°C ainsi qu'une alimentation adaptée (Ferrand, 2010). En effet, la population microbienne a des besoins propres en azote (ammoniac, peptides, acides aminés dont la méthionine) pour les synthèses protéiques, en minéraux (phosphore, soufre, cobalt, manganèse) et en énergie fermentescible (matière organique dont glucides). Cette source énergétique est essentielle pour les micro-organismes et détermine leur activité métabolique conditionnant donc la synthèse d'AGV, source énergétique majeure des bovins (80%) (Rousseau, 2012) (Cf. figure 1 ci-dessous). Idéalement, tous ces éléments doivent être apportés en même temps aux microorganismes ruminants et en continu tout au long de la journée.

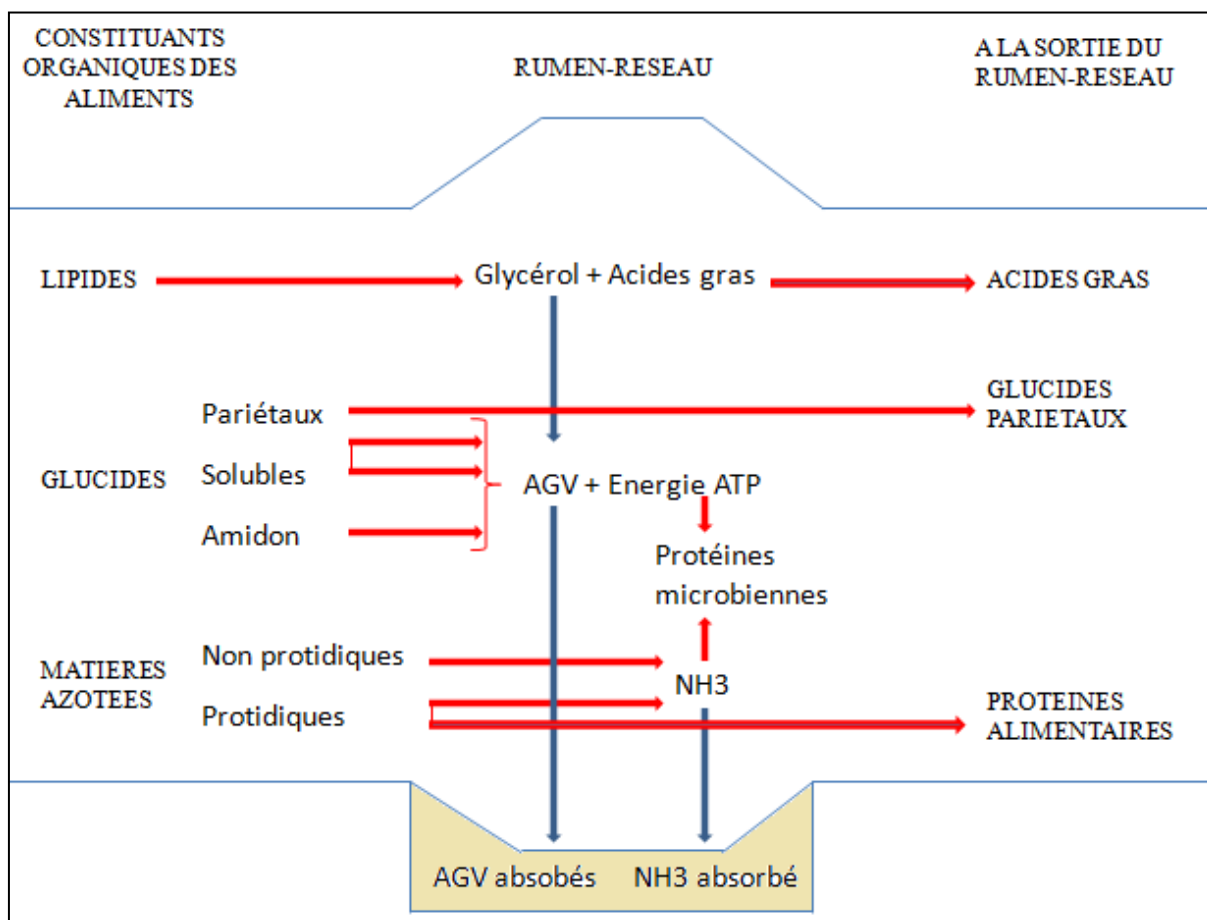


Figure 1 : Schéma résumant la dégradation des constituants organiques des aliments dans le rumen-réseau (d'après Coordination I.N.R.A.P, 1984)

1.1.3 Cinétique de dégradation ruminale des glucides et des matières azotées

Le temps de dégradation ruminale varie selon le type de nutriments et la forme sous laquelle il se présente. Le tableau 1 ci-dessous présente les vitesses de dégradation ruminale des protides et des glucides. L'azote non protéique (urée) et les sucres solubles sont très rapidement dégradés contrairement à la lignocellulose. Les fractions indigestibles ont un temps de séjour ruminal qui varie entre 25 et 60 heures (Remond *et al.*, 1995) selon le niveau d'ingestion des animaux, la nature, forme, présentation et densité énergétique de la ration.

PROTIDES	Vitesse de dégradation	GLUCIDES	Vitesse de dégradation
Azote non protéique (urée)	Ultra rapide	Sucres solubles (mélasses)	4 à 8 %/mn
Protéines solubles rapidement dégradables (ensilages/tourteaux colza,soja)	0,5 à 4,5 % / mn	Amidon,pectines	20 à 80%/h
Protéines insolubles progressivement dégradables (drèches)	2 à 30% / h	Cellulose très fermentescible (Pulpes/ensilage)	4 à 12% /h
Azote indégradable et indigestible .Blocage par lignine,tannage,formol, surchauffe. Tanin de chataignier...	0	Cellulose fermentescible (foin tardif) Lignocellulose (paille)	1 à 3% /h

Tableau 1 : Vitesse de dégradation des protides et glucides dans le rumen (d'après C. Rousseau, 2012)

i Adhésion des microorganismes ruminiaux

La dégradation ruminale des aliments nécessite la colonisation du bol alimentaire ruminal par les microorganismes. La phase d'adhésion initiale débute rapidement, 10 minutes après l'arrivée du substrat dans le rumen (Koike *et al.*, 2003). Il s'en suit une augmentation du nombre de bactéries attachées s'expliquant par l'adhésion de bactéries qui étaient libres dans le rumen ainsi que par la prolifération des bactéries déjà attachées au substrat (Koike *et al.*, 2003).

L'adhésion des microorganismes ruminiaux est sous l'influence de plusieurs facteurs liés aux bactéries (âge, état de leur enveloppe, phénomènes de compétition), à l'environnement ruminal (température, pH, taux d'oxygénation), et au substrat (surface, teneur en parois végétales, taux d'hydratation, charge ionique) (Miron *et al.*, 2001).

ii Dégradation ruminale des glucides

Un phénomène de stockage transitoire des polysaccharides (jusqu'à 1 à 2 heures après le repas) par les microorganismes ruminiaux peut retarder la dégradation des glucides (Sauvant & Van Milgen, 1995).

On distingue deux types de glucides selon leur localisation au sein des tissus végétaux : les glucides pariétaux, et les glucides intracellulaires (ou cytoplasmiques). Les glucides cytoplasmiques comprennent les sucres solubles (fructose, saccharose) et les polyosides de réserve (tel que l'amidon). Les glucides pariétaux correspondent à la cellulose, aux hémicelluloses et à la pectine. La paroi végétale peut aussi contenir des substrats non glucidiques tels que la lignine et les cires (Jarrige *et al.*, 1995). La proportion de paroi par rapport à la matière sèche des fourrages est variable selon la maturité des végétaux. Elle correspond à 30 à 40% de la matière sèche chez des fourrages jeunes, contre 60 à 75% de la matière sèche chez des fourrages plus âgés (Sauvant, Grenet & Doreau, 1995).

La dégradation ruminale des glucides débute avec l'hydrolyse des polymères glucidiques en oses à 5 ou 6 atomes de carbone grâce aux enzymes synthétisées par les bactéries vivant dans le rumen. Ces microorganismes vont ensuite fermenter ces produits en acide pyruvique via le phénomène de glycolyse. Il existe ensuite plusieurs voies métaboliques dépendant du type de régime alimentaire qui amènent à la formation de lactate et d'AGV (Acides Gras Volatils) à partir de l'acide pyruvique (Russell & Wallace, 1988). Les AGV (dont les principaux sont : acide acétique C2, acide propionique C3 et acide butyrique C4) permettent de synthétiser l'ATP nécessaire pour l'entretien, la croissance et les synthèses microbiennes). Les AGV répondent à environ 70 % des besoins en énergie des ruminants (Bergman, 1990) et sont absorbés, pour la plupart, au niveau de la paroi ruminale.

La dynamique de dégradation des glucides pariétaux dépend du type d'aliment. Les glucides pariétaux ne présentent pas de fraction soluble immédiatement dégradable et leur dégradabilité peut parfois comprendre un temps de latence très important (Sauvant & Van Milgen, 1995).

iii Dégradation ruminale des protéines

Les protéines alimentaires sont dégradées en peptides puis en acides aminés via des réactions d'hydrolyse catalysées par des enzymes (protéases, peptidases) produites par les microorganismes ruminants. Les acides aminés sont ensuite désaminés, ce qui engendre la formation de NH₃ ainsi que de chaînes carbonées. Ces dernières sont ensuite fermentées, ce qui entraîne la formation d'AGV.

L'activité protéolytique est liée à la densité de population de la flore ruminale et aux conditions du rumen (pH, temps de rétention des aliments, synchronisation de l'apport des nutriments disponibles) (Vérité, Peyraud, 1988). La vitesse d'hydrolyse varie en fonction des caractéristiques physico-chimiques des protéines alimentaires (solubilité, structure, accessibilité) (Vérité & Peyraud, 1988, Jouany *et al.*, 1995). Ainsi, l'affinité des enzymes microbiennes est moindre pour les protéines ayant une conformation tridimensionnelle rigide (due notamment à la présence de ponts disulfures), ce qui leur confère une faible dégradabilité (Debroas *et al.*, 1998). Aussi, la dégradabilité est une caractéristique propre à chaque aliment. L'importance de la dégradation des matières azotées dépend de cette caractéristique mais également de la durée de leur séjour dans le rumen et de l'intensité de l'activité microbienne.

Les microorganismes ruminants présentent d'autre part une activité de synthèse protéique qui dépend de leur densité, de leur taux de croissance et du rendement avec lequel ils utilisent les substrats et l'énergie dont ils disposent. Les substrats utilisés sont le NH₃ et les chaînes carbonées et de façon plus marginale des acides aminés issus de la protéolyse. Il peut y avoir un délai de 8 à 9 heures entre la dégradation d'une protéine et la synthèse microbienne qui en est issue (Sauvant & Van Milgen, 1995). Ces protéines d'origine microbienne couvrent 60 à 70 % de l'apport protéique des ruminants (Demeyer & Fievez, 2000).

Le NH₃ ruminal peut aussi être acheminé jusqu'au foie où il sera transformé en urée. Il existe un phénomène de recyclage de l'urée en NH₃ via la salive ou la paroi ruminale qui est essentiel lorsque les animaux consomment des aliments pauvres en protéines ou en azote dégradable. Quand ces voies sont saturées l'urée est éliminée par l'urine ou le lait : ainsi, il existe une l'existence d'une relation linéaire entre le NH₃ ruminal et l'urée du lait ou du sang (Sauvant *et al.*, 2001) (Cf. Figure 2 ci-dessous).

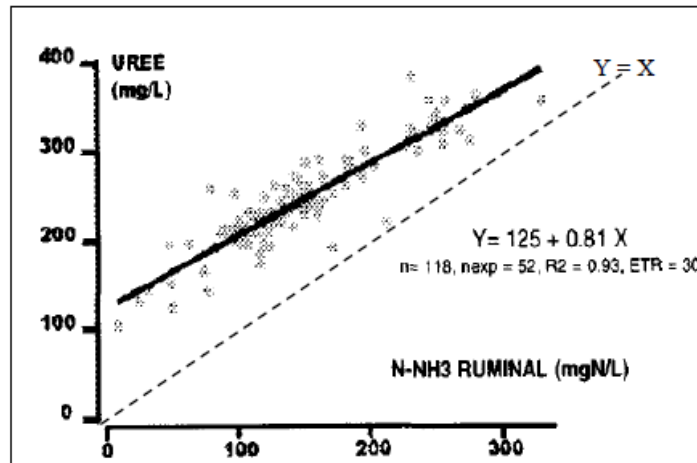


Figure 2 : Teneur en urée du sang ou du lait en fonction du taux de NH3 ruminal (d'après Sauvante et al., 2001)

1.2 Besoins alimentaires des bovins

Les dépenses en énergie, azote, minéraux et vitamines que les animaux effectuent pour leur entretien (fonctionnement de base de l'organisme) et leur production (croissance, engraissement, gestation, lactation) déterminent des besoins énergétiques, azotés, vitaminiques et minéraux. Ces derniers doivent être couverts par des apports alimentaires prenant en compte les pertes au niveau digestif et métabolique. Le calcul des besoins tient compte du fait que les nutriments ne sont pas entièrement disponibles : l'utilisation (digestion et métabolisme) des substances alimentaires engendre des pertes.

1.2.1 Besoins énergétiques

i Estimation des besoins énergétiques chez les Bovins

Le besoin énergétique d'entretien correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour assurer le métabolisme de base, le maintien du poids de l'animal dans des conditions de vie normales. Il s'exprime en calories et est proportionnel à la surface corporelle, on peut le calculer en élevant le poids vif à la puissance 0,75 (ceci correspond au poids métabolique). Il existe de nombreux facteurs de variation tels que la race (supérieure de 5 à 20% chez les

vaches laitières par rapport aux vaches à viande), le sexe, l'âge, l'individu, l'activité physique, les conditions climatique, etc.

On ajoute à ce besoin d'entretien des besoins énergétiques de production. On peut calculer le Niveau de Production des animaux en faisant le rapport entre les dépenses totales (entretien + production) et les dépenses d'entretien (Cf. tableau 2). Ce niveau est à 1 pour un animal à l'entretien, il augmente avec la quantité produite. Les dépenses de production laitières deviennent supérieures aux dépenses d'entretien à partir de production de 12 kg de lait par jour, elles sont 4 fois plus élevées chez les vaches laitières hautes productrices (Jarrige, 1988) (Cf. tableau 2). Concernant la croissance, la dépense énergétique s'accroît avec l'âge car le gain de poids comporte une part de plus en plus élevée de matière sèche dans laquelle la proportion de gras augmente (Coordination INRAP, 1984, Wolter. 1992).

Niveau de production	Vache reproductrice : kg de lait à 4% de matières grasses	Taurillon à l'engrais : kg de croit par jour
1	Entretien	Entretien
1,2		0,5
1,4	Gestation (dernier mois)	0,9
1,6	7	1,2
1,8	9	1,5
2	12	1,8
2,5	17	
3	23	
3,5	28	
4	34	
4,5	40	
5	45	
5,5	51	

Tableau 2 : Niveau de production pour différentes catégories de bovins (d'après Jarrige, 1988)

ii Estimation de la valeur énergétique des aliments

L'Energie Brute (EB) correspond à la quantité de chaleur (kcal) dégagée au cours de la combustion d'un aliment, dans un calorimètre, sous pression d'oxygène. Elle varie selon la teneur en matière organique et la composition chimique de l'aliment. En moyenne 1g de glucides libère 4,1 kcal, 1g de matières azotées 5,6 kcal et 1g de lipides 9,3 kcal. Avec les analyses chimiques des aliments on peut alors calculer la valeur énergétique brute, pour les fourrages elle est d'environ 4,3 kcal par g. Il est ensuite possible d'en déduire l'Energie Digestible en soustrayant à l'EB l'Energie perdue dans les Fèces (EF) :

$$ED = EB - EF$$

Les pertes dans les fèces sont plus importantes avec des fourrages (de 25 à 50%) qu'avec des céréales riches en amidon (12 à 25%). Elles augmentent de plus avec l'âge et le degré de lignification des fourrages (Jarrige, 1988).

La digestibilité de l'Energie (dE) est le rapport entre l'ED et l'EB. Très variable, elle correspond au principal facteur de variation de la valeur énergétique des aliments.

$$dE = \frac{ED}{EB}$$

Lors de la digestion microbienne des aliments dans le tube digestif, environ 8% de l'EB sont perdus sous forme de méthane (Energie Gazeuse (EG)) (Vermorel, 1988). Les composés qui sont absorbés mais pas utilisés par l'organisme sont éliminés dans l'urine (notamment sous forme d'urée). Il s'agit de l'Energie Urinaire (EU) qui correspond généralement à 5% de l'EB mais qui peut augmenter lorsque les aliments sont plus riches en matières azotées (Vermorel, 1988). L'énergie alimentaire utilisable par les tissus de l'organisme, ou Energie Métabolisable (EM) est calculée en enlevant à l'ED les pertes d'énergie sous forme gazeuse (EG) et d'urine (EU).

$$EM = ED - EG - EU$$

Pour s'affranchir des pertes en extra-chaleur (C), qui sont variables selon les fonctions physiologiques concernées, on définit l'Energie Nette (EN).

$$EN = EM - C$$

Il s'agit de l'énergie alimentaire qui permet de couvrir les dépenses d'entretien et de production de l'animal. On ne peut cependant pas attribuer une seule valeur énergétique à un aliment donné car l'efficacité d'utilisation de l'EM varie selon le stade physiologique des animaux. Ainsi, l'EM est utilisée avec une efficacité plus faible pour l'engraissement (kf allant de 35 à 56 %) que pour l'entretien (km allant de 66 à 76%) et la lactation (kl allant de 56 à 64%) (Vermorel, 1988). La teneur en EN des aliments représente leur valeur énergétique et est exprimée dans le système des unités fourragères (UF) dans lequel 1UF correspond à la valeur énergétique nette d'un kilogramme d'orge récolté au stade de grain mûr. On distingue les Unités Fourragères Laitières (UFL avec 1 UFL = 1700 kcal) pour les bovins à l'entretien, en croissance modérée et les femelles en lactation, et les Unités Fourragères Viande (UFV avec 1 UFV = 1820 kcal) pour les bovins à croissance rapide (supérieure à 750 grammes par jour).

$\text{Valeur UFL} = \frac{\text{EM} \times \text{kl}}{1700}$	$\text{Valeur UFV} = \frac{\text{EM} \times \text{kmf}}{1820}$
---	--

Avec kmf : efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable en énergie nette pour l'entretien et la production de viande

1.2.2 Besoins en azote

i Le Système PDI

Les besoins en azote des bovins sont exprimés dans le système PDI (Protéines Digérées dans l'Intestin), mis en place par l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) en 1978. Ce dernier quantifie l'absorption des acides aminés au niveau intestinal en prenant en considération le fait que la part dégradable de l'azote alimentaire présente des possibilités de conversion en protéines microbiennes.

La figure 3 ci-dessous résume le principe du système PDI. Parmi les MAT contenues dans un aliment, l'azote non protéique (urée) et les protéines solubles sont totalement dégradées dans le rumen. D'autre part, une partie des protéines insolubles est utilisée par les micro-organismes ruminiaux. Le reste des protéines alimentaires et les protéines microbiennes (PDIM) sont par la suite digérés dans la caillette et principalement dans l'intestin grêle. (Vérité & Peyraud, 1988).

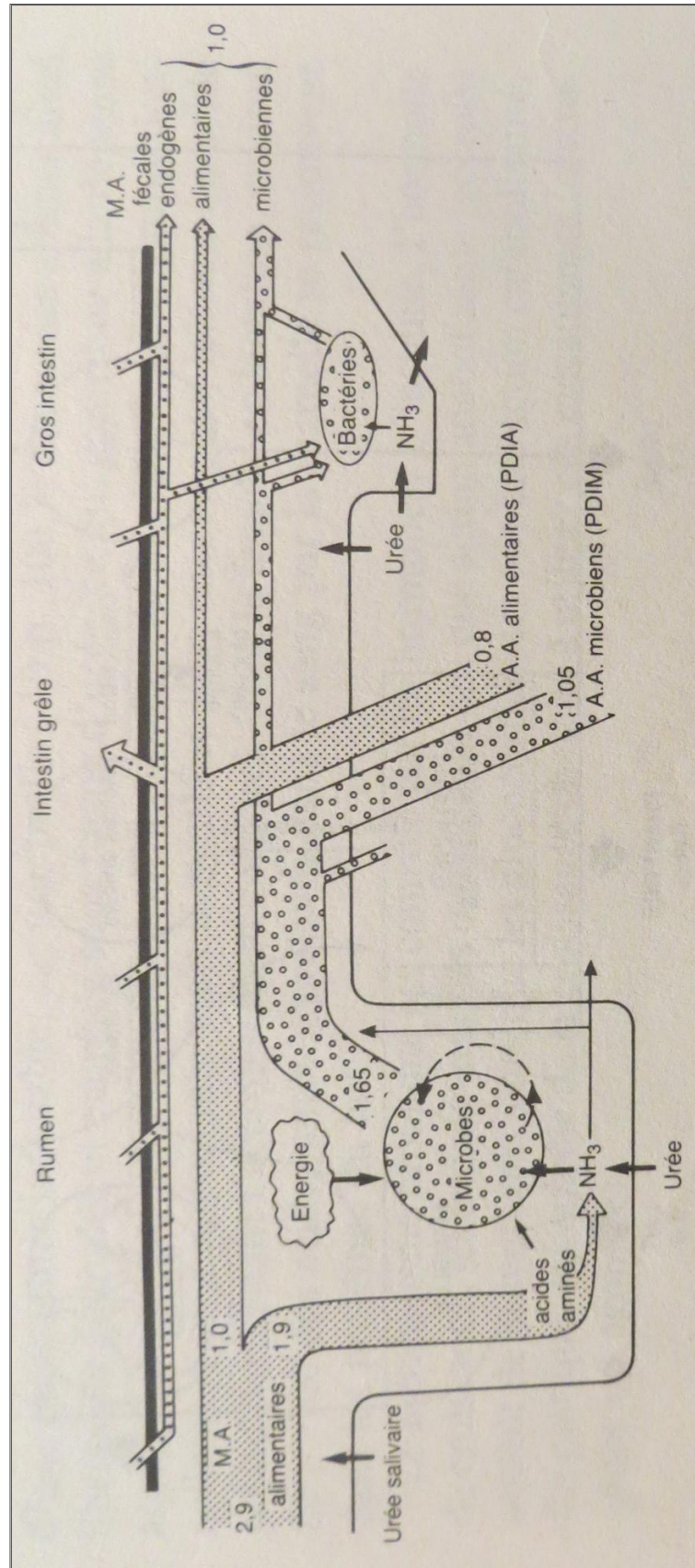


Figure 3 : Schéma représentant l'utilisation digestive des matières azotées chez les ruminants (Vérité & Peyraud, 1988).

Les flux en kg de matières azotées par jour correspondent à l'exemple d'une vache produisant 30L de lait par jour.

Au niveau de l'intestin grêle passent d'une part les matières azotées non digestibles (éliminées via les fèces). D'autre part arrivent les PDIA, protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire. Le flux des PDIM parvient lui-aussi à l'intestin grêle, sa quantité est dépendante de la capacité de synthèse protéique des microorganismes du rumen (Vérité & Peyraud, 1988). Celle-ci nécessite la présence d'azote dégradable et d'énergie. Ainsi, la valeur PDIM d'un aliment peut être calculée de deux façons selon que le facteur limitant des synthèses protéiques des microorganismes soit l'azote (valeur PDIMN) ou l'énergie (valeur PDIME). La quantité globale d'acides aminés issus d'un aliment correspond donc à la plus faible des valeurs potentielles PDIE (Protéines Digérées dans l'intestin quand l'Energie disponible est le facteur limitant) et PDIN (Protéines Digérées dans l'intestin quand l'azote (N) disponible est le facteur limitant) (Vérité & Peyraud, 1988).

<p>PDIE = PDIA + PDIME (si l'énergie disponible est le facteur limitant) PDIN= PDIA + PDIMN (si l'azote disponible est le facteur limitant)</p>

ii Rationnement et équilibre PDIE-PDIN

Lors du calcul de ration l'égalité des valeurs PDIE et PDIN est recherchée car elle permet une valorisation optimale des glucides fermentescibles et de l'azote dégradable (Wolter, 1992). Un léger déficit en PDIN peut être accepté en raison du phénomène de recyclage de l'urée sanguine par diffusion à travers la paroi ruminale ou via la salive. Cependant il est important que les apports énergétique et azoté dans le rumen soient suffisants, équilibrés, synchrones, continus dans le temps pour permettre un bon équilibre des populations de microorganismes ruminants en satisfaisant leurs besoins en glucides fermentescibles et en protéines dégradables.

L'équilibre PDIE-PDIN est sous l'influence de nombreux facteurs. Ainsi la dégradabilité intrinsèque des protéines dépend de la nature des matières premières. D'autre part, le temps de séjour des aliments dans le rumen varie selon la présentation physique de l'aliment (mouture), son pouvoir osmotique dans le rumen, le niveau alimentaire (quantité totale ingérée en 24h), la fréquence et la nature des repas (fourrages, concentrés, mélange, etc.). L'efficacité de la digestion microbienne dépend aussi de l'équilibre alimentaire engendrant une adaptation de la microflore à son substrat. De plus, elle diminue avec la

vitesse de transit ruminal (il accélère chez les vaches à haute production qui ont un niveau alimentaire élevé (Wolter, 1992)).

Un excès d'apport de PDIN peut avoir des conséquences néfastes pour la santé de l'animal, en particulier liées à la sollicitation excessive des fonctions hépatiques de détoxification, avec des effets potentiels sur la fertilité. Un excès d'azote peut se manifester par une augmentation de l'urémie et du taux d'urée dans le lait (Cf. I-1.1.3). Une faible valeur de ces paramètres signifie que la quantité d'azote dégradable disponible est insuffisante, ce qui entraîne une diminution de l'activité de la micro flore ruminale. D'autre part, une valeur élevée de ces paramètres est le signe d'une intoxication ammoniacale chronique.

iii Estimation des besoins azotés chez les bovins

Le calcul des besoins en PDI des bovins prend en compte la satisfaction du besoin d'entretien de la masse corporelle protéique (besoin estimé à 3,25g par kg de poids métabolique, qui est cependant un peu plus élevé chez le jeune que chez l'adulte) (Michol *et al.*, 2003), ainsi que les besoins en azote liés à la production.

Chez les bovins, les réserves corporelles et la capacité de mobilisation des protéines sont faibles, au contraire de la capacité de mobilisation d'énergie. Selon le type et le niveau de production, les besoins en azote peuvent être très augmentés par rapport au niveau d'entretien (Cf. tableau 3 ci après). Pour déterminer ces besoins de production, il faut se baser sur la composition des produits et le rendement d'utilisation métabolique des PDI (Vérité & Peyraud, 1988). Chez les vaches gestantes, le besoin azoté augmente fortement pendant les quatre derniers mois de gestation. Les besoins de croissance et d'engraissement varient selon l'âge, la race (génotype tardif ou précoce), les objectifs de production et le rendement d'utilisation des acides aminés (variable selon l'âge, la race, le sexe) (Michol *et al.*, 2003).

	Apport recommandé PDI (g PDI/j)	
	Valeur exacte	Valeur pour une vache laitière de 600 kg
Entretien	95+PV/2	395
Gestation	0,07*PV(naissance)*exp(0,11*semaine gestation)	de 75 à 250 (en fin de gestation)
Lactation (par kg de lait à 32g/kg de TP)	TP/0,64	50
Croissance (par kg de gain)	250 à 350 (selon teneur en protéines)	/

Tableau 3 : Apports recommandés en PDI pour les bovins selon leur stade physiologique (Agabriel, 2007, tables de l'INRA).

1.2.3 Besoins en minéraux

i Besoins en éléments minéraux majeurs

L'évaluation des besoins d'entretien et de production en éléments minéraux majeurs ainsi que du Coefficient d'Absorption Réelle (CAR) de ces éléments permet de déterminer les Apports Journaliers Recommandés (AJR, Cf. Tableau 4 ci-dessous) (Meschy, 2007). Les éléments minéraux ne sont pas « digérés » dans le tube digestif mais « mis en solution » parfois après destruction enzymatique de leur support organique. Ils sont alors pour la plupart sous forme ionique et peuvent être absorbés au niveau de la paroi intestinale. Le taux de fibres pariétales des fourrages et la présence d'oxalates diminuent la disponibilité des minéraux et des oligo-éléments (Gueguen & al., 1988). L'absorption des minéraux peut aussi être diminuée lors d'un transit intestinal rapide (notamment lors de la consommation de fourrages jeunes et riches en eau ou de fourrages secs finement broyés). Le CAR caractérise l'absorption réelle des éléments minéraux et est calculé en fonction de l'absorbabilité propre à chaque aliment et de la capacité d'absorption de l'intestin (Gueguen & al., 1988).

	Phosphore	Calcium	Magnésium	Sodium	Chlore	Potassium
Croissance		0,663 MSI + 0,008PV		0,015PV	0,23PV	0,105PV
Gestation	0,83MSI +	0,015PV	0,007PV	0,015PV	0,023PV	0,105PV
Lactation	0,002PV	0,663 MSI + 0,008PV		0,023PV	0,035PV	0,150PV

Tableau 4 : Estimation du besoin d'entretien (g/jour) en éléments minéraux majeurs absorbés (d'après Meschy, 2007), MSI : Matière Sèche Ingérée, PV : poids vif en kg

Les besoins de production s'ajoutent à ce besoin d'entretien (Meschy, 2007). Les besoins liés à l'accrétion minérale lors de la croissance diminuent avec l'âge de l'animal. Ils sont importants pour Ca et P mais existent aussi pour les autres éléments minéraux majeurs. Les besoins supplémentaires liés à la gestation sont surtout présents dans le dernier tiers de gestation et concernent principalement le Ca et le P. Les besoins de lactation sont directement déterminés par la composition minérale du lait.

ii Besoins en oligo-éléments

Les principaux oligo-éléments nécessaires chez les Bovins sont le Fer (Fe), le Cuivre (Cu), le Zinc (Zn), le Cobalt (Co), le Manganèse (Mn), l'Iode (I) et le Sélénium (Se). Les besoins nets des bovins en oligo-éléments ne sont pas bien connus. Les apports recommandés ont été estimés à partir d'études des seuils de carence et incluent une marge de sécurité (Cf. tableau 5 ci-dessous).

Elément	Limite de carence	Apport recommandé	Limite de toxicité
Cu	7	10	30
Co	0,07	0,3	10
I	0,15	0,2-0,8	8
Mn	45	50	1000
Zn	45	50	250
Se	0,1	0,1	0,5
Mo	/	0,1	3

Tableau 5 : Apports recommandés en oligo-éléments et seuils de tolérance (mg/kg MS de la ration) (Meschy 2007, adapté de INRA 1988)

1.2.4 Capacité d'ingestion (CI)

La couverture des besoins alimentaires dépend de la quantité et de la qualité des aliments apportés d'une part, et de la capacité des animaux à les ingérer d'autre part. Le système nerveux central régule l'ajustement de la prise de nourriture en fonction des besoins des animaux et de leurs dépenses énergétiques. Pour les bovins consommant des rations à base de fourrages, la CI est limitée par la capacité du rumen et l'adaptation de l'ingestion à l'évolution des dépenses énergétiques est parfois insuffisante (Gueguen & al., 1988). La CI augmente avec la taille des animaux lors de la phase de croissance. Elle augmente également chez les vaches en lactation. Pendant le premier tiers de la lactation, l'augmentation de la CI a beaucoup moins d'amplitude que la hausse des dépenses énergétiques associées à la production laitière. Lors de la deuxième moitié de lactation, la CI diminue mais moins rapidement que les dépenses énergétiques. Chez les vaches gestantes, la CI reste stable en fin de gestation (voire diminue car la présence du fœtus diminue l'espace disponible dans la cavité abdominale) alors que les dépenses énergétiques augmentent.

La CI dépend d'autre part de facteurs extrinsèques. Elle diminue en cas de fortes chaleurs, augmente lors de grands froids. L'ingestion est diminuée en cas de manque d'abreuvement, de mauvais état nutritionnel, de troubles digestifs (parasitaires, métaboliques), de stress (transport, modification du cadre de vie, phénomènes de compétition entre individus,...) (Gueguen & al., 1988). L'ingestion volontaire est plus importante pour des fourrages jeunes et pour des fourrages où la proportion de limbes est importante (Peyraud & Astigarraga, 1998). Ce dernier fait peut être favorisé dans le cas d'un apport de fertilisant minéral ou organique, qui permet une consommation de végétaux plus jeunes et qui favorise une augmentation de la biomasse foliaire importante (Peyraud & Astigarraga, 1998).

1.3 Valeur alimentaire des fourrages secs

1.3.1 *La digestion des fourrages chez les ruminants*

Les fourrages apportent les fibres grossières nécessaires à un bon fonctionnement ruminal, ils constituent en général l'essentiel de la ration de base des ruminants. Ils contiennent l'appareil aérien (tiges, feuilles et appareil reproducteur) de plantes fourragères naturelles ou cultivées. Il existe plusieurs types de fourrages qui se différencient selon leur mode de conservation et leur teneur en matière sèche (MS). Les foins, fourrages dont il sera question dans cette thèse sont ceux qui contiennent le plus de MS (de 84 à 92%) (Coordination IRAP, 1984).

L'essentiel de la digestion des fourrages a lieu dans le rumen : 40 à 70% des matières azotées, la quasi-totalité des glucides solubles et la grande majorité des fibres y sont dégradées. Le temps de séjour de ces aliments dans le rumen est tributaire de leur teneur en parois végétales (Demarquilly & Andrieu, 1988).

1.3.2 *Valeur alimentaire des fourrages*

i Valeur énergétique des fourrages

La valeur énergétique ou énergie nette des fourrages (exprimée en UF) dépend principalement de la digestibilité de l'énergie brute qu'ils contiennent qui est en corrélation avec la digestibilité de la matière organique (dMO) (Baumont *et al.*, 2009). Comme les constituants intracellulaires ont une digestibilité très élevée (lipides, matières azotées) voire totale (sucres, fructosanes), la dMO d'une plante fourragère dépend essentiellement de sa teneur en parois végétales (teneur en cellulose brute). Celle-ci s'accroît avec l'âge de la plante et la digestibilité des parois diminue avec le vieillissement des tissus et l'accroissement de la part de tissus lignifiés. Ainsi, une augmentation de la teneur en parois indigestibles de 10 g/kg de MS entraîne, pour toute plante fourragère, une diminution de la digestibilité de 1 % et de la valeur UFL de 0,02 unité par kg de MS (Duru *et al.*, 2008). La vitesse de lignification et donc la diminution de digestibilité, varie selon le type de végétaux, elle est très élevée chez les graminées au premier cycle et plus lente pour les repousses de graminées et pour les légumineuses.

De plus, la valeur alimentaire des fourrages dépend de leur mode de récolte et de conservation. En fonction des conditions météorologiques, plusieurs coupes (en général 3 ou 4) peuvent être réalisées chaque année sur une culture de plantes fourragères. Le stade de végétation des plantes fourragères lors du premier cycle et l'âge des repousses lors des cycles suivants sont des facteurs prépondérants concernant la digestibilité du fourrage récolté. Ainsi, celle des graminées fourragères chute après le stade début épiaison de 0,4 à 0,5 % par jour, ce qui correspond à une diminution de 0,008 à 0,01 UFL/kg de MS (Demarquilly *et al.*, 1998).

Les fourrages utilisés dans la partie expérimentale de cette thèse sont des foin. Ces derniers sont obtenus grâce au fanage au cours duquel la teneur en MS du fourrage devient supérieure ou égale à 85%. Ceci permet d'inactiver les enzymes de la plante et d'éviter le développement des moisissures. Lors du séchage, il existe des pertes dues à la respiration des cellules végétales, des pertes mécaniques de feuilles qui concernent principalement les légumineuses, et éventuellement un phénomène de lessivage par la pluie. Ces phénomènes engendrent une diminution des constituants intracellulaires (surtout des sucres et des matières azotées) et une augmentation du taux de parois cellulaires (Demarquilly & Andrieu, 1988). Tout ceci entraîne une diminution de la digestibilité et donc de la valeur alimentaire du fourrage.

ii Valeur azotée des fourrages

La valeur azotée des fourrages est exprimée dans le système PDI (Cf. 1.2.2) afin de prendre en compte la part de digestion microbienne ruminale des protéines. Selon que le fourrage est déficitaire en azote ou en énergie, on s'en tient respectivement aux valeurs PDIN ou PDIE. Ces deux valeurs sont calculées en ajoutant deux termes. Le premier correspond aux PDIA (protéines non dégradées dans le rumen). Le deuxième terme représente les protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne (PDIM) (Sauvant *et al.*, 2001).

Il existe différentes méthodes de mesure de la dégradabilité des matières azotées : la dégradabilité enzymatique, la fermentescibilité in-vitro en présence de contenus prélevés dans le rumen, la méthode in-sacco. Les deux premières méthodes présentent l'inconvénient de ne pas décrire l'évolution dans le temps de la dégradation protéique. Les valeurs PDIA sont

calculées en fonction de la teneur en MAT des fourrages, de leur dégradabilité théorique in-sacco (DT), et de la digestibilité réelle dans l'intestin des protéines non dégradées (Vérité & Peyraud, 1988). Elles sont regroupées dans les tables de l'INRA. En pratique, le dosage des MAT et l'utilisation conjointe des valeurs des tables (DT et dr correspondant au type de végétaux concernés, de leur numéro de coupe, de leur mode de conservation) sont utilisés pour déterminer la valeur azotée d'un fourrage (Baumont *et al.*, 2009). Cependant, il est intéressant d'évaluer la dégradabilité des matières azotées pour des aliments pouvant présenter des variations, notamment dans ce travail de thèse pour mettre en évidence un éventuel effet dû à la fertilisation avec Bactériolit®.

$$\begin{aligned} \text{PDIA} &= 1,11 \times \text{MAT} \times (1-\text{DT}) \times \text{dr} \\ \text{PDIMN} &= 0,64 \times \text{MAT} \times (\text{DT} - 0,10) \\ \text{PDIME} &= 0,093 \times \text{MOF} \end{aligned}$$

Avec : MAT = Teneur en matières azotées totales de l'aliment
DT = Dégradabilité Théorique in-sacco
dr = digestibilité réelle des acides aminés dans l'intestin grêle
MOF = Matière Organique Fermentescible de l'aliment

La DT des matières azotées des fourrages varie selon la famille botanique, le stade de végétation au moment de la récolte, l'âge des repousses (Antoniewicz *et al.*, 1995, Nozières et al., 2007). La DT des fourrages augmente de façon curvilinéaire en fonction de leur teneur en MAT qui traduit les effets du stade de végétation et du niveau de fertilisation azotée. Pour les graminées, la DT est plus importante pour les plantes au premier cycle que pour les cycles suivants. Le mode de conservation des fourrages influe également sur la DT : plus le degré de fanage augmente, plus la DT diminue (Cf. figure 4). Ainsi la DT des foin est plus faible que celle des ensilages. Pour un foin de Ray Grass Anglais, la DT varie entre 69 s'il est récolté à un stade précoce (début d'épiaison) et 64 s'il est récolté à un stade tardif (floraison).

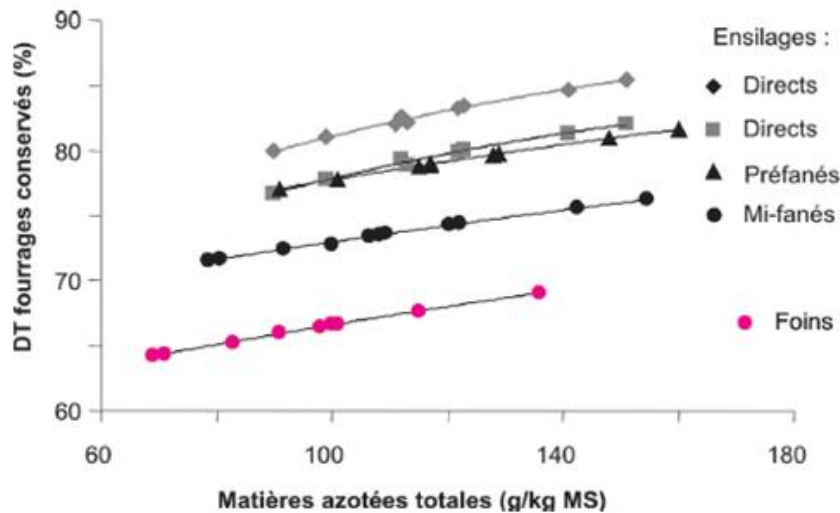


Figure 4 : Variations de la DT avec les teneurs en MAT du fourrage conservé pour le Ray Grass anglais exploité au premier cycle de végétation, selon s'il est conservé en ensilage ou en foin (d'après Nozières et al., 2007)

Les matières azotées sont beaucoup plus présentes au niveau des feuilles de légumineuses ou des limbes de graminées qu'au niveau des tiges. Cette différence est d'autant plus importante quand les plantes vieillissent car la composition des feuilles est moins vite modifiée que la composition des tiges (chez qui la proportion de parois cellulaires augmente) (Vérité & Peyraud, 1988). Les légumineuses ont une teneur en matières azotées supérieure aux graminées (Baumont *et al.*, 2009).

Un équilibre entre les valeurs PDIE et PDIN de la ration est nécessaire pour une valorisation optimale des glucides fermentescibles et de l'azote dégradable (Cf. I-1.2.2). Or si la teneur en MAT dégradables est inférieure à 100 g/kg de MS (soit une teneur en MAT de 130g/kg dans des foins) (Baumont *et al.*, 2009), le fourrage peut être considéré comme manquant de PDIN par rapport aux PDIE. Ainsi, les graminées récoltées à un stade tardif ou peu fertilisées sont généralement déficitaires en PDIN par rapport aux PDIE. Au contraire, les graminées récoltées à un stade précoce et surtout les légumineuses ont une valeur PDIN plus élevée que la valeur PDIE.

iii Ingestibilité des fourrages

Un fourrage est caractérisé par sa valeur alimentaire d'une part et par son ingestibilité d'autre part. Les unités d'encombrement (UE) ont été définies par l'INRA afin de caractériser la capacité des fourrages à être ingérés en plus ou moins grande quantité lorsqu'ils sont distribués à volonté. Le système des UE utilise un aliment de référence (une bonne herbe de pâturage dont la matière sèche contient 15% de matières azotées, 25% de CB et dont la dMO est de 77%) valant par définition une unité d'encombrement. On distingue les UEL, unité utilisée pour les vaches laitières et les UEB utilisées pour tous les autres bovins. L'animal standard pour les UEL est une vache adulte de 600 kg en pleine lactation produisant 25 kg de lait à 4% de matières grasses. Ce type d'animal consomme 17 kg de MS de l'herbe standard. De la même façon, un animal standard est défini pour les UEB : une génisse d'élevage de 400 kg de race laitière. Cet animal consomme 8,5 kg de MS de l'herbe standard (Demarquilly & Andrieu, 1988).

L'encombrement d'un fourrage est lié à son temps de séjour dans le rumen qui dépend de sa teneur en parois végétales (Baumont et al., 1999). Les constituants intracellulaires étant rapidement ingérés, l'encombrement est principalement dû aux tissus lignifiés. Ces derniers restent dans le rumen tant qu'ils n'ont pas été réduits via la digestion microbienne ruminale en particules assez petites pour passer dans le feuillet (Demarquilly & Andrieu, 1988). La valeur d'encombrement d'un fourrage influe directement sur la quantité de fourrage ingérée par les animaux (Cf. I-1.1.2). Ainsi les fourrages jeunes qui sont moins riches en parois cellulaires ainsi qu'en lignine que des fourrages plus âgés ont une valeur d'encombrement plus faible et sont ingérés en plus grandes quantités par les bovins. Les fertilisations azotée et organique favorisent une croissance rapide des plantes et permettent leur consommation à des stades plus précoces qu'en l'absence de fertilisation (car les rendements en MS attendus sont plus rapidement obtenus) (Peyraud & Astigarraga, 1998). Elles peuvent donc avoir une influence positive sur la valeur d'encombrement des fourrages et la quantité ingérée par les bovins.

2 Etude agronomique

2.1 Intérêts et limites de la fertilisation minérale et organique

Les techniques de fertilisation ont participé au développement et à l'intensification de l'agriculture moderne en permettant d'obtenir de hauts niveaux de rendements.

2.1.1 Principe

Les plantes absorbent la plupart des minéraux qui sont nécessaires à leur croissance dans le sol. Les éléments principaux sont le carbone (C), l'hydrogène (H) et l'oxygène (O). Or certains éléments tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), et le soufre (S) ont tendance à être en quantités trop faibles dans le sol pour permettre un développement optimal des plantes. La fertilisation minérale a donc pour but de compléter l'offre du sol et des apports organiques pour ces éléments.

Le rendement d'une culture est fixé par le niveau de l'élément le plus limitant (loi du minimum). L'azote reste souvent le principal facteur limitant la production végétale car, contrairement au phosphore et au potassium, les plantes en nécessitent de grandes quantités (il représente 3 à 4% de leur matière sèche (Mérigout, 2006)). Cet élément est présent en quantités très importantes dans l'atmosphère, cependant sous cette forme-là, il est inutilisable pour la plupart des plantes. De rares végétaux (légumineuses par exemple) sont capables de capter l'azote atmosphérique grâce à une symbiose avec des micro-organismes (bactéries du genre *Rhizobium*) présents au niveau de nodosités situées sur leurs racines. Pour répondre aux besoins des autres végétaux, on utilise des engrais azotés dont les formes les plus utilisées sont le nitrate d'ammonium ou ammonitrate (NH_4NO_3), forme qui engendre généralement le moins de pertes d'azote, et l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) (Protin *et al.*, 2009). L'urée est utilisée en pulvérisation foliaire ou bien est incorporée dans les sols (souvent associée à des inhibiteurs d'uréases pour éviter des pertes par volatilisation).

2.1.2 Influence de la fertilisation minérale sur les rendements fourragers

Les rendements agricoles ont augmenté de façon importante entre les années 1960 et 1980 dans de nombreux pays grâce à différentes évolutions : introduction de variétés améliorées capables de produire davantage, lutte plus efficace contre les ravageurs, les maladies et les mauvaises herbes, amélioration des méthodes et systèmes de culture, emploi des engrais minéraux (FAO, 1981).

La fertilisation azotée des prairies (qui constituent environ 60% de la SAU des exploitations françaises en polyculture - élevage (SCEES, 2006)) est nécessaire pour obtenir une production d'herbe susceptible de satisfaire les besoins des animaux. Des enquêtes ont montré qu'en France les prairies reçoivent en moyenne une dose d'azote de 90 kg N/ha par an dont 55 kg N/ha à partir d'engrais minéraux et 35 kg N/ha provenant d'apports organiques et que le rendement moyen, toutes prairies et tous modes d'exploitation confondus, est de 7,5 t MS /ha par an (SCEES, 2006) (Protin *et al.*, 2009). La réponse à la fertilisation minérale en termes de rendement dépend des espèces cultivées, de la nature du sol ainsi que des facteurs climatiques.

L'expérience et les données de terrain ont mis en évidence le fait que l'augmentation du rendement de production d'une culture diminue au fur et à mesure que les quantités d'engrais introduites augmentent. En effet, lors de hauts niveaux de fertilisation, les capacités des végétaux pour assimiler ces intrants peuvent être dépassées. Ceci définit la loi des rendements décroissants dans la production agricole (FAO, 1981). Cette loi est illustrée par la figure 6 ci-dessous qui représente l'évolution du rendement dans le cas d'une application croissante d'azote sur des prairies de fauche en Moyenne Belgique et en Haute Belgique (Knoden *et al.*, 2007).

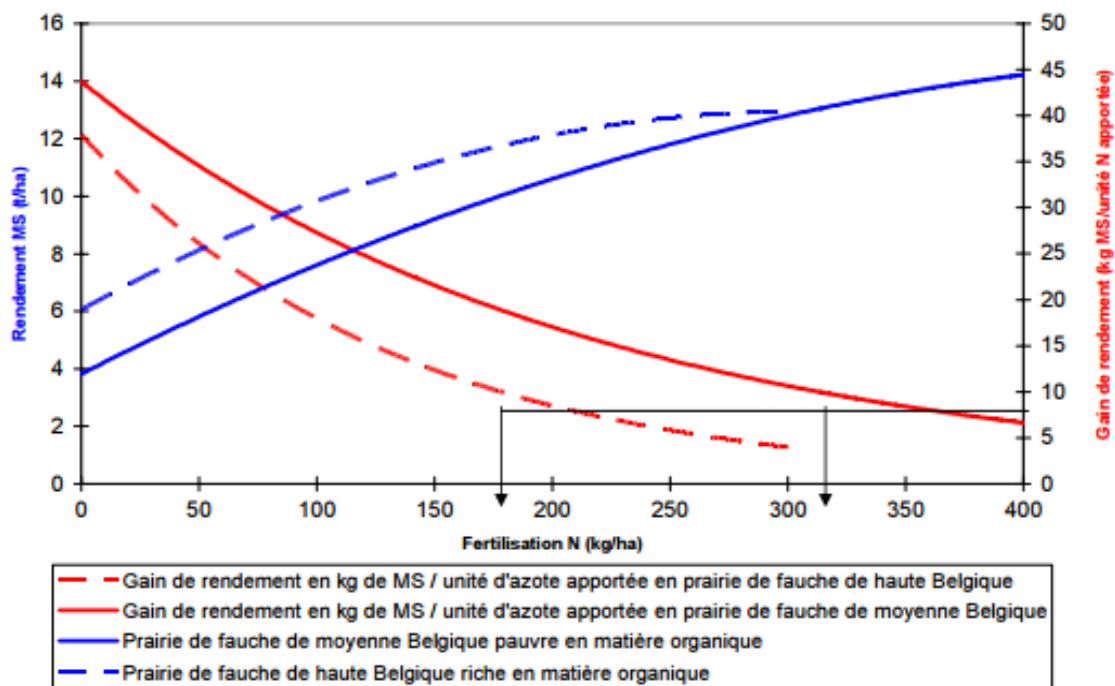


Figure 5 : Evolution des rendements d'une prairie de fauche en fonction de niveau de fertilisation azotée (d'après Knoden et al., 2007)

Ce phénomène est à prendre en compte pour trouver la dose d'application d'engrais qui est la plus profitable à l'agriculteur. La dose économique optimale est ainsi calculée en faisant le rapport entre l'augmentation de rendement obtenue et le coût des engrais apportés.

2.1.3 Influence de la fertilisation minérale sur la qualité des fourrages

Outre l'accroissement du rendement, la fertilisation peut agir sur la qualité de l'herbe.

i Fertilisation azotée et teneur en MAT

La teneur en azote des plantes, qui dépend majoritairement de leur état de nutrition azotée, a tendance à diminuer lors de chacun des cycles de croissance. La fertilisation permet de limiter ce phénomène en fournissant de l'azote disponible dans le sol. Ainsi, un apport d'azote pour le premier cycle de croissance à une date correspondant à une somme de températures de 200°C cumulés après le premier janvier est conseillé (Protin *et al.*, 2009). A ce stade, les jeunes plantes ont en effet beaucoup de matière azotée à produire pour leur croissance mais leur système racinaire en développement ne couvre qu'une faible partie du

sol. D'autre part, un apport d'azote tardif (en mars-avril, selon les conditions climatiques) peut augmenter la teneur en MAT de l'herbe pour les coupes suivantes (Arvalis - Institut du Végétal 2008) (Protin *et al.*, 2009).

Le taux de MAT dans les plantes a une évolution quasi linéaire par rapport à l'apport azoté. Selon la nature des plantes, une augmentation moyenne de 50 à 90g MAT/kg MS est observée pour un apport de 100 kg d'azote par hectare (Antoniewicz *et al.*, 1995). Cette réponse atteint son maximum lors des deux semaines suivant l'application du fertilisant (Wilman *et al.*, 1976). Parallèlement à cela, la fertilisation entraîne une augmentation de la masse produite, ce qui amène à une dilution des matières azotées contenues dans les plantes. Le rendement en MAT donc une augmentation rapide pendant les premières semaines de croissance, mais atteint ensuite un plateau, ou une légère diminution (Cf figure 6 ci-dessous).

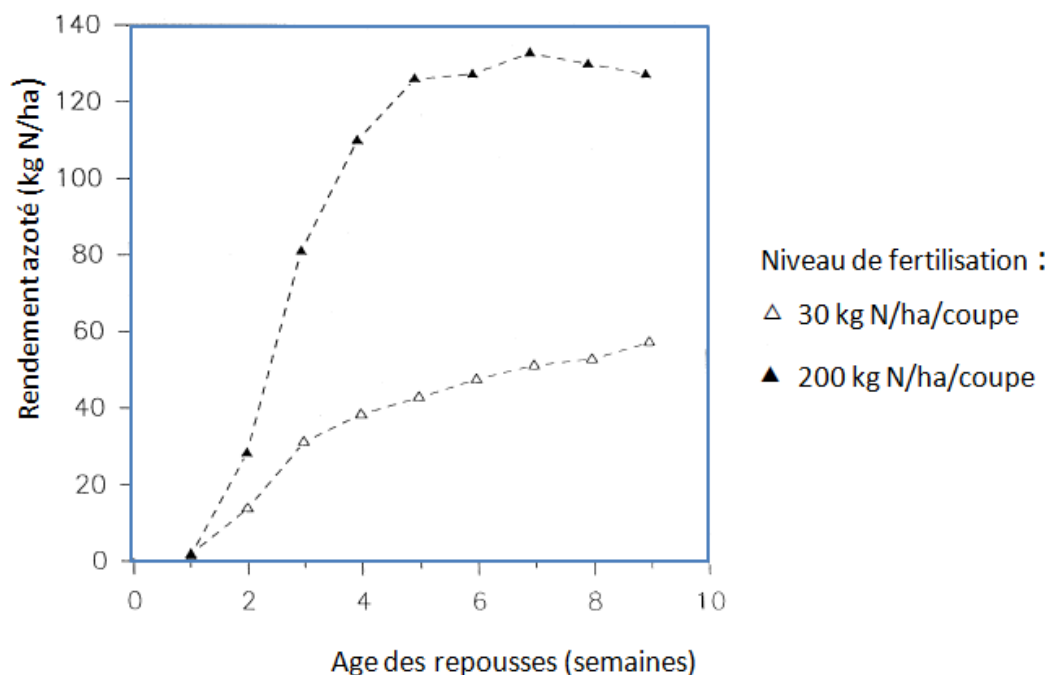


Figure 6 : Effet du niveau de fertilisation azotée sur le rendement azoté d'un Ray Grass Italien, selon l'âge de repousse (d'après Wilman, 1975)

Cependant, l'utilisation de l'azote de ces fourrages fertilisés riches en MAT par les ruminants n'est pas optimale (Peyraud, 2000) et on observe seulement une faible augmentation du flux d'azote alimentaire et microbien au niveau de l'intestin (Peyraud, 2000). En effet, la part d'azote protéique par rapport à l'azote total de l'herbe diminue de 90 à 75% quand le niveau de fertilisation passe de 0 à 400 kg N/ha (Reid & Strachan, 1974). Cette richesse des

fourrages en azote sous sa forme non protéique (ANP) peut entraîner une formation d'ammoniac dans le rumen supérieure à la capacité de protéosynthèse des micro-organismes ruminants. De plus, cette synthèse est limitée par la teneur en glucides solubles qui est diminuée lors d'une croissance rapide favorisée par la fertilisation azotée (Peyraud, 2000).

ii Fertilisation azotée et dMO

La dMO des fourrages décroît avec l'âge des végétaux (les taux de cellulose brute et de lignine augmentant au fil du temps). La vitesse de développement de la plante est dépendante de la durée d'éclairement reçu qui peut être corrélée à la température journalière (Duru et al., 2008). La croissance des végétaux peut être représentée par une courbe reliant le taux d'absorption d'azote en fonction du temps. Cette courbe présente une allure sigmoïde permettant de différencier trois étapes dans la croissance des espèces prairiales (Lemaire *et al.*, 1982) : une phase lente de début de croissance pendant laquelle l'appareil foliaire se met en place où l'absorption d'azote est déjà très active (enrichissement en azote des tissus jeunes), une phase de pleine croissance caractérisée par une vitesse maximale d'absorption de l'azote (l'azote étant plus dilué que dans la phase précédente en raison de l'augmentation de la quantité de matière sèche). Enfin arrive la phase de ralentissement de la croissance au cours de laquelle les premières feuilles émises vieillissent et disparaissent.

La comparaison des vitesses de croissance d'espèces prairiales pour deux extrêmes de nutrition azotée (0 et 100 kg de N/ha) a permis d'observer une vitesse de croissance plus importante pour les hauts niveaux de nutrition azotée : 10kg/MS/ha par degré jour contre 7,2 kg/MS/ha par degré jour (Cf figure 7 ci-après). Ces observations ont été réalisées dans le cas d'une prairie où l'azote n'est pas limitant et où la minéralisation organique est importante. Ces résultats sont en accord avec ceux de Duru et Calvière en 1993 qui ont observé, pour des prairies à niveau de nutrition minérale satisfaisant des vitesses de croissance qui varient de 8 à 10 kg par degré jour pour un niveau de 80 kg N/ha à plus de 13 kg pour un niveau de 100 kg /N/ha (Duru & Calvière, 1993).

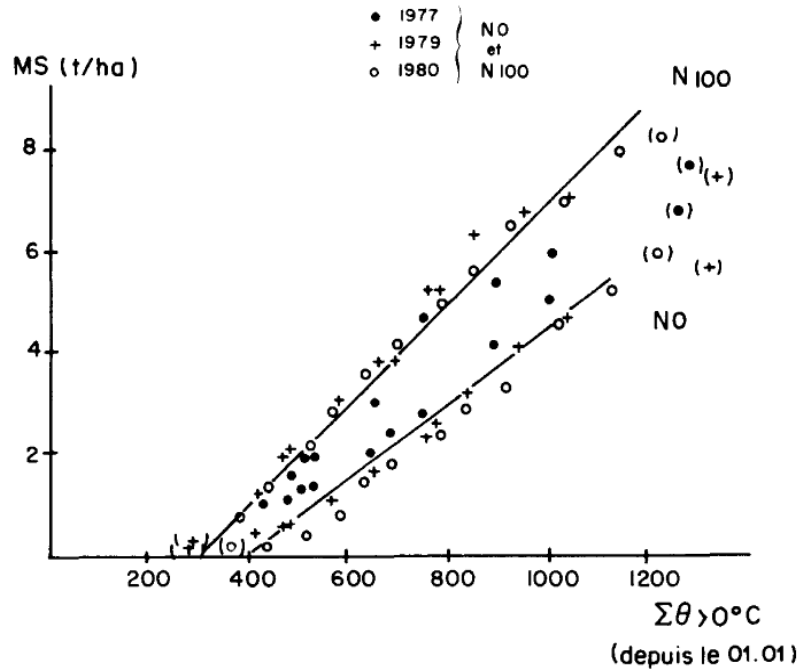


Figure 7 : Effet de l'azote sur la vitesse de croissance.

Relation entre la croissance et les sommes de températures pour deux niveaux d'azote (0 kg N/ha et 100 kg de N/ha) et trois années d'expérimentation (1977, 1979 et 1980). Prairie permanente, Le Pin-au-Haras (en t/ha de MS et températures journalières moyennes cumulées depuis le premier janvier) (d'après Lemaire et al., 1982)

La digestibilité de la matière organique des plantes dépend de leur croissance ainsi que du vieillissement de leurs tissus. Au cours du vieillissement, la dMO diminue avec l'augmentation du taux de lignine dans les parois végétales. Lors de la phase de croissance, la part du compartiment cytoplasmique (contenu cellulaire entièrement digestible) dans la biomasse totale diminue en raison de l'augmentation de la proportion de tissus de soutien (parois) (Duru *et al.*, 2008).

Quand l'azote est limitant, la proportion de cytoplasme dans la biomasse du limbe est inférieure à celle des plantes ayant reçu une fertilisation azotée (Cf. figure 8 ci-après). Cependant, la diminution de digestibilité des parois est plus rapide pour les plantes ayant un haut niveau de nutrition azotée, en raison de la croissance plus rapide (Duru *et al.*, 2008).

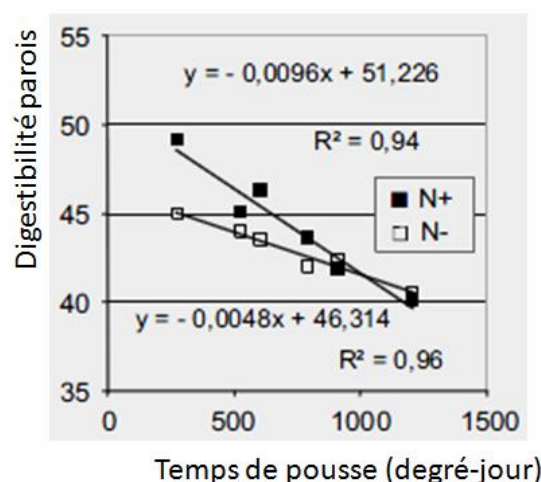


Figure 8 : Digestibilité des parois (NDF) de plantes adultes en fonction du temps de pousse, pour des traitements avec (N+) ou sans (N-) azote (d'après Duru et al., 2008)

En revanche, la fertilisation azotée peut avoir un effet positif indirect sur la digestibilité en permettant une utilisation plus précoce des graminées (alors récoltées plus tôt car les rendements en MS attendus sont plus rapidement obtenus).

La fertilisation azotée peut aussi jouer un rôle sur les proportions des différentes espèces végétales d'une prairie. Concernant les associations graminées-trèfle blanc, elle peut diminuer le pourcentage de trèfle blanc (plus digestible que les graminées) et provoquer une baisse de la digestibilité (Protin *et al.*, 2009).

iii Fertilisation azotée et ingestibilité des fourrages

Sur le même principe que pour la dMO, la fertilisation azotée peut permettre une consommation plus précoce des fourrages par les animaux et avoir ainsi un effet positif indirect sur la quantité ingérée (Cf. I- 1.2.4) (Peyraud & Astigarraga, 1998). Cependant pour des fourrages ayant un même âge de repousse, l'ingestibilité à l'auge n'est pas influencée (Demarquilly, 1977).

La fertilisation azotée peut favoriser l'ingestion de l'herbe au pâturage en garantissant un couvert avec une biomasse de feuilles vertes facilitant la préhension des plantes par les animaux (Peyraud & Astigarraga, 1998).

iv Fertilisation phosphatée et potassique

Ces deux types de fertilisation contribuent eux-aussi à un accroissement du rendement des prairies qui est à moduler selon le type de végétaux et de sols concernés. La fertilisation phosphatée permet d'augmenter le phosphore disponible dans le sol et d'en augmenter la teneur dans les plantes (notamment chez les légumineuses). Ceci a peu d'influence sur l'ingestibilité et la digestibilité des fourrages (Demarquilly, 1977). Cependant, cette modalité favorise le développement des légumineuses et peut donc améliorer la valeur azotée et la teneur en calcium des fourrages issus de prairies multispécifiques.

La fertilisation potassique a, elle aussi, peu d'influence sur l'ingestibilité et la valeur énergétique des fourrages. Cependant le potassium, qui est présent en quantités plus importantes dans les cellules des jeunes plantes, joue un rôle métabolique important, en particulier lors de la photosynthèse. Il a été montré qu'une carence en potassium entraîne une diminution de la photosynthèse au profit de la respiration nocturne chez des plantes fourragères (Richard, 2005). Ainsi, en favorisant l'activité photosynthétique des plantes, un apport de potassium peut modifier la composition des glucides et constituants azotés des plantes. Avec ce type de fertilisation, la part de glucides complexes (cellulose) augmente par rapport aux glucides simples, la proportion d'azote soluble diminue et l'azote protéique augmente, ce qui favorise une bonne utilisation ruminale de cet élément (Demarquilly, 1977).

2.1.4 Les conséquences néfastes de la fertilisation minérale

L'azote est assimilable par les plantes sous forme de nitrate (NO_3^-). Comme le complexe argilo-humique du sol est lui aussi chargé négativement, il ne retient pas cet ion qui est donc très soluble et mobile. Quand le nitrate est apporté en excès dans le sol, il peut donc être entraîné par lessivage et participer à la pollution des nappes phréatiques en engendrant des phénomènes d'eutrophisation. Il s'agit d'une détérioration des écosystèmes aquatiques due à une prolifération d'algues planctoniques et de certains types de zooplancton. Ceci engendre des modifications des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau. Aussi, les eaux dont la teneur est supérieure à 50 mg/L (teneur maximale recommandée par l'OMS, 1993) de nitrate sont déclarées impropres à la consommation. Les excès de phosphore

amènent au même type de phénomène, ce qui a obligé à durcir les règles d'épandage, notamment en aviculture.

D'autre part, les bactéries du sol soumises à des conditions d'anaérobiose convertissent le nitrate en azote gazeux N_2 , ce processus est appelé dénitrification. Dans certaines conditions (forte concentration en nitrate, sol acide), les produits finaux de cette réaction peuvent être les oxydes nitriques (N_2O), gaz à effet de serre qui participent aussi à la destruction de la couche d'ozone.

L'ion ammonium (NH_4^+) est quant-à lui bien retenu par le sol grâce à sa charge positive, mais il a tendance à se volatiliser dans l'atmosphère et peut aussi être rapidement converti en nitrate par les microorganismes du sol (nitrification).

Les inquiétudes sont vives quant à ces effets néfastes du nitrate et la limitation de l'excès de nitrate au sein des plantes et des sols est un des enjeux de l'agriculture actuelle.

2.2 Intérêts de la fertilisation par compost par rapport à la fertilisation minérale

Le compostage est une alternative qui concilie une utilisation optimale des effluents d'élevage et les impératifs de protection de l'environnement par la réduction des risques de pollution. Il est possible d'obtenir du compost à partir de substrats organiques très variés. Dans cette partie seront traités uniquement les procédés de compostage de fumiers de fermes.

2.2.1 Principe du compostage

Il s'agit d'une dégradation biologique réalisée par des microorganismes en milieu aéré et humide (Benoist, 2003). Cette biotransformation se déroule en deux étapes et nécessite la présence d'un substrat organique et frais, d'une population microbienne diversifiée, de conditions d'aération et d'humidité adéquates (Richard, 2005).

La première phase, dite de dégradation active à vitesse exponentielle dure environ un mois pour les fumiers de bovins, la température s'élève alors jusqu'à 65-70°C et le volume de

matière diminue d'environ 50% (Luxen *et al.*, 2006). Elle est suivie d'une phase lente de maturation au cours de laquelle les réactions se poursuivent à vitesse linéaire (Cambardella *et al.*, 2003).

Le fumier fournit de l'énergie directement biodégradable et des sources de nutriments pour les microorganismes qui vont, en présence d'oxygène et d'humidité cataboliser ce substrat. Ainsi les glucides simples et complexes, les MAT et les molécules lipidiques du substrat sont catabolisés par hydrolyse enzymatique. Une partie des produits est utilisée pour la nutrition microbienne (immobilisation ou organisation de l'azote via la synthèse de protéines microbiennes), tandis que l'autre partie est minéralisée (sous la forme NH_4^+ pour l'azote).

D'une part, la décomposition dans le sol des débris organiques végétaux sous l'action des micro-organismes et de la synthèse de nouveaux produits immobilisés mène à l'obtention d'une fraction stable de matière organique appelée humus.

D'autre part, le carbone minéralisé est rejeté sous forme de dioxyde de carbone, et l'hydrogène et l'oxygène sont relâchés sous forme d'eau. Lors de cette décomposition aérobie, de grandes quantités d'énergie sont relâchées (14 kJ/g d' O_2 consommé) et s'accumulent sous forme de chaleur. Cette augmentation de température permet d'atteindre de meilleurs taux de dégradation microbienne. Les taux maximums sont observés pour des températures avoisinant 60°C), ils sont alors au moins 5 fois supérieurs aux taux de dégradation observés à 20°C (Richard, 2005). Cette hausse de température permet d'autre part de détruire certains pathogènes ainsi que des graines d'adventices. Cependant, si la température dépasse 65-70°C, la diversité des microorganismes ainsi que la cinétique des réactions diminuent (Richard, 2005). Le contrôle de la température lors de la première phase est donc un facteur prépondérant pour la qualité du futur compost.

Des procédés de ventilation mécanique du compost existent mais sont rarement utilisés en routine (Richard, 2005). Dans tous les cas, le fumier de départ doit être suffisamment humide et pailleux afin que l'andain réalisé (tas allongé de section triangulaire d'environ 1,50 m de hauteur et 2,50 m de largeur à la base) soit assez aéré (Luxen *et al.*, 2006). L'andain doit être retourné deux fois afin d'homogénéiser le processus de compostage

à l'intérieur du tas. Un délai de d'environ 3 semaines est laissé entre chaque retournement. Le fumier composté peut être épandu trois semaines après cette dernière étape.

Le rapport C/N du fumier indique si le processus d'immobilisation ou de minéralisation va dominer lors de la décomposition des matières organiques.

- Quand $C/N=25$, les processus de minéralisation et d'immobilisation ont la même importance (Paul & Clark, 1989).
- Quand $C/N<25$, la minéralisation est favorisée et de l'azote minéral est relâché dans le sol.
- Quand $C/N>25$, de l'azote inorganique est pris dans la solution du sol pour couvrir les besoins des microorganismes : il y a immobilisation d'azote (Paul & Clark, 1989).

La minéralisation du C est positivement corrélée au rapport C/N. La relation entre ce ratio et la minéralisation de l'azote est quant-à elle moins régulière (Cambardella *et al.*, 2003). Ce manque de corrélation peut être expliqué par des pertes d'azote par dénitrification, ainsi que par volatilisation en ammoniac. Ce dernier phénomène représente la perte majeure en azote minéral, notamment pour les fumiers frais ou composts âgés de moins de 2 semaines (Cambardella *et al.*, 2003).

2.2.2 Intérêts du compostage

i Qualité agronomique et environnementale

Le compost est riche en matière organique stable ce qui engendre une libération lente de l'azote. De plus, il est riche en phosphore et potasse dont la disponibilité est du même ordre que celle décrite pour les engrais minéraux (Benoist, 2003, Luxen *et al.*, 2006).

D'autre part, l'azote contenu dans le fumier est utilisé pour les synthèses des microorganismes. Ainsi, il est incorporé dans la masse microbienne, ce qui diminue les pertes d'azote dans l'environnement par lessivage ou volatilisation (Cambardella *et al.*, 2003).

Lors d'une fertilisation avec du compost mûr la quantité d'humus dans le sol augmente. Il constitue avec l'argile le complexe argilo-humique. Ce dernier améliore les capacités du sol à la rétention d'eau et la fixation et restitution des éléments fertilisants (Ca, P,...) (Benoist, 2003, Luxen *et al.*, 2006).

ii Un produit « hygiénisé », et désodorisé

L'élévation de la température lors du compostage permet de détruire les germes pathogènes, ce qui limite les risques sanitaires en prairie. Des études ont montré un rapide déclin du nombre d'E. Coli (99%) lors des 7 premiers jours de compostage. Après un mois, le taux d'E. Coli est non détectable (Larney & Blackshaw, 2003). Il a également été observé une diminution du taux d'oocystes de *Cryptosporidium* et de cystes de *Giardia*, tous deux parasites des bovins ayant un potentiel zoonotique. Ces diminutions étaient d'autant plus importantes que la température lors de la première phase de compostage était élevée (Larney & Blackshaw, 2003).

Le compostage diminue drastiquement la viabilité des graines d'adventice. Les températures nécessaires pour éliminer la viabilité des graines sont spécifiques à chaque espèce. Cependant, un manque de corrélation entre la température atteinte lors des procédés de compostage et la viabilité des graines laisse penser que d'autres mécanismes entrent en jeu, comme par exemple une augmentation de la concentration d'acide acétique ayant des effets inhibiteurs sur la germination de certaines espèces végétales (Larney & Blackshaw, 2003). Ainsi, il y a au cours des années une modification de la flore prairiale caractérisée par une augmentation des graminées et un maintien des légumineuses, ce qui en améliore la valeur fourragère.

Grâce à la réorganisation de l'azote ammoniacal et uréique contenus dans le fumier, l'odeur du compost est moins forte que dans les fumiers non compostés. Ceci permet de réduire les distances d'épandage par rapport aux tiers (10 m au lieu de 50 m pour du fumier), permettant ainsi à l'agriculteur d'augmenter la surface épandable de ses terrains. De plus cette « désodorisation » limite les problèmes d'appétence pour les animaux qui pâturent dans les prairies fertilisées avec ce procédé.

La répartition au champ d'un compost est meilleure que celle d'un fumier car il s'émiette facilement. Comme les éléments fertilisants sont plus concentrés, la dose épandue est réduite (de 30 à 50 %), par rapport à un fumier « frais », ce qui est intéressant en termes de coût et de transport.

2.2.3 Limites du compostage

Le compost contient de l'azote sous forme de matière organique stable, qui a donc un effet lent sur les sols et les végétaux. Ainsi, il y a peu d'effets directs la première année où on utilise ce mode de fertilisation et l'arrière effet lors des années suivantes dépend des conditions climatiques (Cambardella *et al.*, 2003).

D'autre part, les pertes par lessivage, volatilisation et dénitrification (Cambardella *et al.*, 2003) sont possibles au début du stockage et les travaux de compostage sont coûteux en temps.

2.2.4 Intérêts potentiels d'un compost traité avec des micro-organismes

i Accélération du procédé de compostage

L'activité microbienne est la principale responsable de la décomposition des matières organiques lors du procédé de compostage. Le but de l'ajout d'inoculum de micro-organismes est d'accélérer le processus de compostage. L'inoculation est généralement réalisée lors de la première phase de compostage (peu d'information sont actuellement disponibles à propos de l'influence du moment d'inoculation). L'ensemble du processus de compostage n'étant pas gouverné par un type de microorganisme particulier, l'élaboration des inocula résulte de choix complexes (selon le type de substrat à composter ainsi que des conditions environnementales) et donc variables selon les études.

Les informations de la littérature concernant les effets de ces traitements sur le compostage et la qualité du futur compost sont controversées. Cependant il a été montré de façon unanime que l'inoculation d'un compost avec des microorganismes appropriés peut activer la biodégradation des matières organiques, ce qui accélère le procédé initial de compostage et entraîne la diminution des pertes azotées. Celle-ci peut également améliorer la qualité du compost (augmentation de la proportion d'humus, diminution du rapport C/N) (Gaind *et al.*, 2005). En effet, l'activité des enzymes de type déshydrogénases est supérieure chez les composts traités avec des micro-organismes (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000, Reeve *et al.*, 2010). Comme la déshydrogénase est une enzyme ayant un rôle clef dans l'oxydation microbienne des matières organiques, une activité supérieure de cette enzyme suggère une activité microbienne plus importante chez les composts traités.

Les avis divergent concernant une éventuelle augmentation du pic de température dans les composts inoculés avec des microorganismes lors de la première phase du compostage. L'augmentation de température n'est pas toujours observée de façon reproductible (Reeve et al., 2010), cependant plusieurs études semblent s'accorder sur le fait que le compost inoculé avec des microorganismes reste à une température supérieure à 40°C plus longtemps que le compost non traité (Carpenter-Boggs et al., 2000, Lei & Vander Gheynst, 2000).

ii Evolution des populations bactérienne et fongique du sol

Des études ont montré que des composts inoculés présentent une augmentation de la biomasse microbienne par rapport aux composts non inoculés (Sharma et al., 2011, Bolta *et al.*, 2003). Ceci peut s'expliquer par le fait que les microorganismes de l'inoculum, plus adaptés aux conditions présentes lors du compostage prennent le dessus sur les microorganismes initialement présents dans le substrat (Bolta *et al.*, 2003). Que le compost soit inoculé ou non, la population bactérienne est plus élevée lors de la phase thermophile. Lors de cette phase, le nombre de bactéries Gram - diminue, et le nombre de bactéries Gram + est le plus élevé pour des températures aux alentours de 50°C (Bolta *et al.*, 2003). La part d'actinomycètes augmente au cours de la deuxième phase de compostage. Les informations concernant une éventuelle diminution des populations de champignons pour des températures au-dessus de 50°C sont controversées (Klamer, Baat, 1998, Bolta *et al.*, 2003).

Les préparations biodynamiques ajoutées lors du compostage contiennent généralement des champignons à mycorhize, qui ont une très grande importance écologique. Ces champignons sont susceptibles de vivre en symbiose synergique avec des plantes hôtes qui leur sont spécifiques, ainsi que des bactéries de la rhizosphère, via des mécanismes complexes d'association au sein d'une structure appelée mycorhize. Les hyphes de ces champignons étendent le système racinaire des plantes au sol environnant, conférant de nombreux avantages pour les plantes et le sol environnant.

Premièrement, cette « extension racinaire » augmente les zones de contact entre le sol et les racines des plantes, accroissant leur capacité d'absorption en éléments relativement

immobiles tels que le P et le Zn, et favorisant une augmentation de la biomasse végétale (Peyraud & Astigarraga, 1998, Auge, 2001, Sharmaa et al., 2011,).

D'autre part, les hyphes étendent le système racinaire des plantes vers le sol environnant, liant les particules du sol et augmentant leur micro-et macro agrégation (Auge, 2001). Ce fait améliore la qualité du sol, lui conférant une meilleure stabilité face à l'érosion et un plus grand pouvoir de rétention d'eau, diminuant ainsi potentiellement le stress hydrique des végétaux (Auge, 2001).

2.2.5 Cas particulier du Bactériolit®

i Principe

Le Bactériolit® est un produit de fertilisation composé de différentes souches choisies de micro-organismes et d'un support de matières organiques mortes et de matières minérales. Ce produit est destiné à être incorporé au fumier ou au lisier. L'incorporation du Bactériolit® peut être réalisée soit directement sur la litière des animaux, soit dans la fumière. Une étude a montré que son efficacité est plus importante quand il est appliqué au cours de l'accumulation de ces matières organiques plutôt que seulement au moment du curage des fumières (Tristant, 2010).

ii Retours de terrain

D'après le producteur de Bactériolit® (SOBAC), une augmentation de la part de plantes légumineuses parmi les espèces prairiales a été observée sur le terrain par des éleveurs. Ceci n'a pas été observé en station expérimentale lors de l'essai GUMIKO (Cf. II. 1.1.1).

Des témoignages de vétérinaires, d'agronomes et de nutritionnistes indépendants rapportent un meilleur état sanitaire des troupeaux (moins de pertes d'azote sous forme d'ammoniac pour les litières ensemencées avec Bactériolit® et meilleure ambiance dans les bâtiments d'élevage). Sont également rapportés par des utilisateurs de Bactériolit® un meilleur état corporel des animaux dont le poil est bien luisant, ainsi que de meilleures performances de reproduction. Les résultats de l'essai Mazoyer (Tristant, 2010) vont dans ce sens en mettant en évidence une diminution des frais vétérinaires par kg de viande produite

chez des éleveurs utilisant la fertilisation avec Bactériolit® par rapport à des éleveurs non utilisateurs. Le nutritionniste Michel Lepertel a observé que les rations riches en fourrage « méteil 10 plantes » (riches en azote soluble) entraînent une diminution du taux d'urée dans le lait (source SOBAC). Ceci suggère une meilleure utilisation de l'azote chez les animaux consommant de tels fourrages.

Ces témoignages évoquent également une augmentation de l'ingestion des fourrages cultivés avec Bactériolit®, avec notamment une diminution des refus au pâturage et un pâturage possible très rapidement après l'épandage (forte diminution des odeurs par rapport à l'épandage de fumier « frais »).

iii Effets mesurés

- Humification favorisée

Lors d'un apport organique, une partie de l'azote est directement disponible après l'épandage (nitrates). Une autre partie est stockée sous forme d'humus dans le sol. L'incorporation de Bactériolit® à des fumiers, litières ou composts favorise la transformation des matières organiques animales et végétales en humus via la présence importante de microorganismes humificateurs dans le sol. Une étude réalisée en 1996 par le laboratoire Lara Europe Analyse (Toulouse) a mis en évidence qu'avec un apport de Bactériolit®, la production d'acides humiques dans le sol est plus que doublée. Les acides humiques ont été dosés 5 mois après l'application de lisier seul (témoin) ou de lisier + Bactériolit®. Une différence significative a été observée avec 63 mg d'acides humiques par 100g de sol pour le lisier avec Bactériolit® contre 29 mg/100g de sol pour le témoin, soit une augmentation de 117% des acides humiques avec la modalité Bactériolit®. L'apport de Bactériolit® favorise donc la transformation des amendements organiques en humus stable, moins sujet au lessivage, développant la fertilité du sol et limitant l'érosion du sol (via la formation de complexes argilo-humiques).

Les années suivantes, cet humus se minéralise progressivement en libérant une partie de l'azote qu'il contient, ce sont les fournitures par arrière-effet. Ceci suppose que lors d'un apport de Bactériolit®, les effets immédiats de la fertilisation sont moins importants que lors d'un apport d'un fumier « frais » ou d'un engrais minéral, au profit de ces fournitures par

arrière-effet qui auront lieu progressivement, selon les conditions d'humidité, de température, d'aération et de pH du sol.

- Réduction des pertes azotées

Il a été montré qu'avec un apport de Bactériolit®, il y a moins de perte de matière sèche au niveau des tas de fumier (Tristant, 2010). De plus, la perte d'azote est moindre pour des fumiers traités par rapport à un fumier témoin. Une augmentation de la quantité totale d'azote disponible a même été observée (Tristant, 2010). Ceci est lié à la présence d'*Azotobacter*, une bactérie diazotrophe capable de fixer l'azote atmosphérique (Sharmaa et al., 2011).

Lors de l'utilisation de compost traité avec des micro-organismes, la fixation d'azote sous sa forme organique est favorisée, ce qui optimise la gestion de cet élément. En effet cela limite les pertes par lessivage : une étude réalisée par le laboratoire Lara Europe Analyses a montré que ce phénomène était réduit d'un tiers avec l'apport de Bactériolit® par rapport au témoin en conditions fortement lessivantes. L'expérience avait été menée en apportant du lisier de porc avec ou sans Bactériolit® dans des cases avec un sol contenant 73% de sable, sans végétaux susceptibles de retenir l'azote, et en contexte de pluviométrie importante (300 mm en deux mois avec pluies quotidiennes fortes ou faibles selon le modèle).

- Amélioration de la structure du sol

D'autre part, d'après des études réalisées par la SOBAC en 2009 et 2011, la structure du sol est améliorée après plusieurs années d'utilisation du procédé. Ces études se sont basées sur la comparaison de sols de parcelles limitrophes ayant reçu du fumier ensemencé ou non (témoin) par du Bactériolit®. Des coupes de sol ont été réalisées après 3 ans (2009) ou 6 ans (2011) d'utilisation du procédé. Dans les deux cas, il a été observé une augmentation de l'aération du sol, au moins 3 fois supérieure par rapport au témoin. L'aération plus importante favorise la dégradation aérobie des matières organiques par les microorganismes humificateurs. De même, la structure du sol est plus poreuse et la présence de faune (vers de terre) est augmentée lors d'apport de Bactériolit®. Ceci amplifie l'aération du sol et favorise le développement d'un système racinaire des végétaux plus dense et plus profond. Ainsi, lors

de l'essai réalisé en 2011 par la SOBAC, les profondeurs d'enracinement du blé et du maïs étaient en moyenne respectivement de 41 cm et 125 cm pour le sol ayant reçu du Bactériolit® depuis 6 ans contre 30 cm et 71 cm pour le sol témoin, et celle du maïs.

- Amélioration de l'ambiance dans les bâtiments d'élevage et hygiénisation

Le Bactériolit® peut être directement apporté sur les litières ou logettes paillées dans les bâtiments d'élevage. Une étude réalisée par l'ITAVI (Institut Technique de l'Aviculture) en 2006 a montré que les pertes d'azote sous forme d'ammoniac pour un fumier ensemencé avec du Bacteriolit® sont divisées par 5 par rapport au témoin (fumier non ensemencé avec du Bacteriolit®) (Allain & Aubert, 2009). Cette étude comparait les fumiers provenant d'un poulailler ayant reçu le complexe de microorganismes Bactériolit® (ensemencement de la litière 10 jours après la mise en place des animaux), et d'un poulailler témoin pour lequel aucun ensemencement n'avait été réalisé. Le fumier ensemencé contenait plus d'azote que le témoin et cet azote était réorganisé sous sa forme organique. Cela diminue les dégagements gazeux d'ammoniac (il en découle une meilleure ambiance dans les bâtiments d'élevage) et les odeurs, au niveau des litières traitées ainsi que pendant le stockage du fumier et après son épandage.

Lors de cette étude, des analyses microbiologiques ont montré que l'ensemencement au Bactériolit® permet une bonne hygiénisation des composts. En effet, une chute de $18 \cdot 10^5$ à 20 germes/g des *E. coli* après la première phase de compostage, dans les composts ensemencés avec Bactériolit®, ainsi qu'une absence de *Salmonella* et d'oeufs d'*Helminthes*, comme le demande la norme NF U44-051 des amendements organiques (Allain & Aubert, 2009).

- Réduction de l'utilisation d'engrais minéraux et de pesticides

L'utilisation du procédé Bactériolit® permet de réduire considérablement l'utilisation de pesticides (réduction de 36% chez les utilisateurs de Bactériolit® par rapport aux non-utilisateurs, dans une même zone géographique (Tristant, 2010)) et d'engrais via une meilleure valorisation des fumiers (Tristant, 2010). D'après une étude réalisée sur des prairies pendant trois ans au centre AGRAOST, l'apport de Bactériolit® sans apport d'engrais minéral amène des gains en nutrition azoté (+1 UGB/an tous les 3,2 ha de prairie) et en énergie (+1 UGB/an tous les 5 ha de prairie) par rapport à une fertilisation avec un engrais chimique classique. Lors de l'étude réalisée au centre AGRAOST, il a été observé qu'un fumier à 170 uN ensemencé avec du Bactériolit® a donné autant de rendement (en terme de matière sèche récoltée) qu'un fumier composté apportant 250 uN et qu'un lisier à 355 uN. Ceci confèrerait une plus haute efficacité, en terme d'azote apporté, à la modalité Bactériolit®. Cependant, cette dernière interprétation peut être contrebalancée par le fait que, selon les résultats présentés dans la figure 6 (Cf. I-2.1.2), le gain de rendement en kg de MS/uN apportée en prairie permanente de fauche en Haute Belgique (où se situe le centre AGRAOST) est inférieur à 10 kg de MS/uN à partir de 170 uN apportés, et devient inférieur à 5 kg de MS/uN à partir de 250 uN apportés.

La SOBAC travaille actuellement pour obtenir une reconnaissance officielle du fait que la technique de compostage par ensemencement par des microorganismes est plus performante que le compostage mécanique classique.

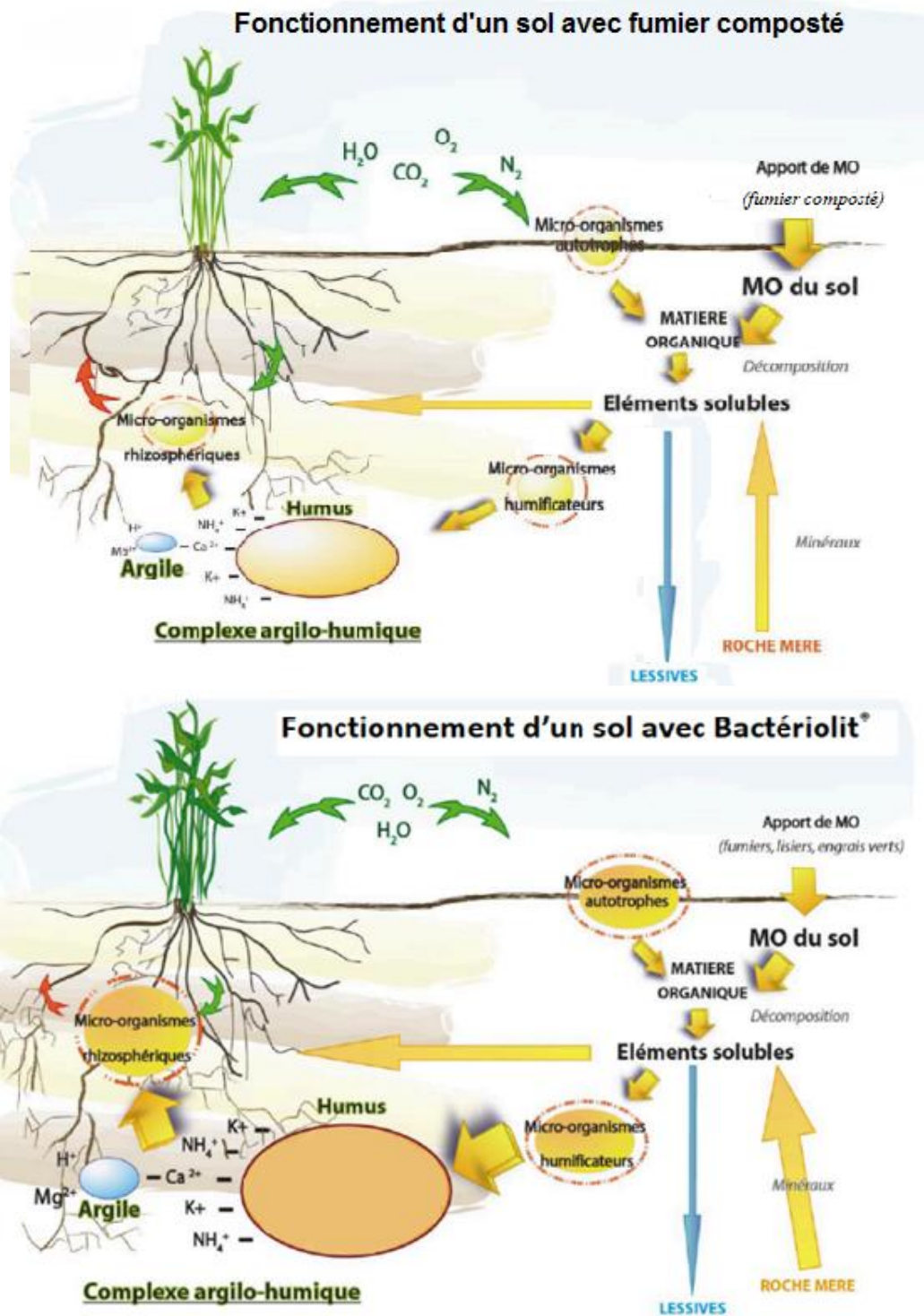


Figure 9 : Schéma comparant le fonctionnement d'un sol avec apport de fumier composté et d'un sol avec apport de fumier composté traité par des micro-organismes

(exemple du procédé Bactériolit, Source SOBAC) : développement des populations de micro-organismes autotrophes, humificateurs et rhizosphériques favorisant la formation d'humus, diminuant le phénomène de lessivage de l'azote minéral (notamment lors du procédé de compostage) et étendant l'aire racinaire des plantes, améliorant leur nutrition minérale (notamment grâce au développement de mycorhizes).

Partie II : Etude expérimentale

1 Matériels et méthodes

1.1 Aliments à tester

Les fourrages testés ont été fournis par le centre expérimental AgraOst (situé en Belgique, à Elsenborn), ils ont été cultivés dans le cadre de l'essai GUMIKO *bis*.

1.1.1 Essai GUMIKO *bis*

L'essai GUMIKO *bis* (Gülle (lisier) Mist (fumier) Kompost (compost) *bis* = 2^{me} édition) était une étude à long terme lancée en 2001, en prairie permanente de fauche. Son but était de montrer comment il est possible de valoriser de façon optimale les effluents d'élevage sans dépasser les besoins physiologiques des végétaux et en respectant les normes d'épandage.

Cette expérimentation consistait à comparer l'efficacité de différents engrais de ferme (6 types de matières organiques), épandus à des doses différentes. Le tableau ci-après résume les 15 modalités de fertilisation étudiées.

Types de matières organiques	Dose d'azote apportée par ces matières
Fumier de bovins composté	130 uN
	170 uN
	210 uN
	250 uN
	350 uN
Lisier de bovins	130 uN
	170 uN
	210 uN
	250 uN
	350 uN
Fumier pailleux frais de vaches laitières	170 uN
Fumier de bovins	170 uN
Fumier de bovins au 'Bactériolit'	170 uN
Compost de fumier biodynamique	130 uN

Tableau 6 : Récapitulatif des 15 modalités de fertilisation comparées dans l'essai GUMIKO (SOBAC, 2009)

uN = unités fertilisante d'azote (1 uN représente 1kg de l'élément chimique N). Compost de fumier biodynamique : provient d'une exploitation voisine travaillant selon le concept de la biodynamie. Ce compost a subi quelques pulvérisations de préparations homéopathiques à base de plantes officinales telles que la camomille, l'achillée, le pissenlit, le millefeuille, l'ortie, l'écorce de chêne et la valériane. Le compost et le traitement homéopathique qu'il a subi servent à stimuler, de façon indirecte, la vie microbienne dans le sol.

Pour chacune de ces modalités 4 parcelles rectangulaires de 8 mètres sur 1,5 mètres étaient cultivées (Cf. Figure 10 ci-dessous et Annexe 1 : plan des parcelles). Ces prairies permanentes étaient composées d'un mélange de :

- graminées de différentes valeurs nutritives : bonnes (Ray Grass, Fléole,...), moyennes (Dactyle, pâturin commun,...), médiocres (Agrostis, Houlque laineuse,...)
- légumineuses (Trèfle blanc, Trèfle violet)
- adventices (Alchemille, Gaillet blanc, Pissenlit, Renoncule âcre, Rumex à feuilles obtuses)

Chaque année trois ou quatre coupes étaient réalisées et différents paramètres étaient étudiés : les rendements de la prairie permanente, l'évolution de la flore, l'évolution des teneurs du sol.



Figure 10: Photographie des parcelles utilisées dans l'essai Gumiko bis

1.1.2 Caractéristiques des fourrages choisis

Dans le cadre de cette thèse deux modalités parmi ces 15 traitements ont été choisies :

- le fumier de bovins 170 uN (fumier « témoin »)
- le fumier de bovins 170 uN traité avec du Bacteriolit® (fumier « bacteriolit® »)

Les fourrages utilisés avaient été conservés sous forme broyée au sein du centre Agra-Ost. Les échantillons disponibles étaient ceux des années 2009 (quatre coupes), 2010 (trois coupes) et 2011 (quatre coupes) (cf. Tableau 7 ci-après). Ces 11 échantillons ont fait l'objet de l'étude in sacco pour chacune des modalités (fourrages témoins et fourrages Bacteriolit®).

Année	Coupe	Fourrages témoins	Masse de poudre témoin (g)	Fourrages Bacteriolit®	Masse de poudre Bacteriolit® (g)
2009	1	T1	74	B1	40
	2	T2	65	B2	44
	3	T3	58	B3	52
	4	T4	44	B4	24
2010	1	T5	55	B5	42
	2	T6	57	B6	45
	3	T7	27	B7	36
2011	1	T8	42	B8	93
	2	T9	36	B9	83
	3	T10	34	B10	89
	4	T11	29	B11	24

Tableau 7 : Dénomination et quantité des échantillons de fourrages disponibles

Les poudres d'échantillons avaient été broyées à la grille de 1 mm pour les années 2009 et 2010, et de 0,7mm pour l'année 2011.

D'autre part, les données des résultats d'analyses chimiques pour chacune de ces coupes ainsi que pour les quatre coupes de l'année 2008 ont été transmises par le centre Agra-Ost. Ces chiffres ont été utilisés pour l'étude statistique de la composition chimique des fourrages.

1.2 Analyse chimique des fourrages : étude statistique

1.2.1 Données et paramètres étudiés

Les résultats des analyses chimiques et de calcul de valeurs alimentaires réalisées en 2008, 2009, 2010 et 2011 ont été transmis par le centre Agra-Ost. Ces analyses ont été réalisées sur :

- 4 coupes pour 2008, 2009 et 2011
- 3 coupes pour 2010

Les paramètres étudiés étaient les :

- Matières Azotées Totales (MAT) dosées par la méthode Kjeldhal
- Protéines Digestibles dans l'Intestin (PDI) : les données étaient initialement exprimées dans le système néerlandais avec la notion de DVE. Cette notion est similaire aux PDI du système français développé par l'INRA. En effet, le système PDI a été choisi comme base du système

DVE néerlandais, auquel ont été rajoutés des modifications provenant d'autres systèmes (pertes d'azote dans le rumen, estimation des besoins d'entretien et de gestation, Tamminga *et al.*, 1994).

- Unités Fourragères « Lait » (UFL) : il s'agit de la quantité d'énergie fournie pour la production laitière, la référence étant l'énergie contenue dans 1 kg d'orge de référence (1 UFL= 1700 kcal d'énergie nette).
- Unités Fourragères « Viande » (UFV) : il s'agit de la quantité d'énergie nette fournie pour la production de viande, la référence étant l'énergie contenue dans 1 kg d'orge de référence pour l'entretien et le croît chez l'animal à l'engraissement (1 UFV=1820 kcal d'énergie nette).
- Protéines Digérées dans l'Intestin grâce à l'azote (PDIN) : il s'agit des protéines d'origines alimentaires non digérées par le rumen mais digérées dans l'intestin, ainsi que des protéines synthétisées par les micro-organismes ruminiaux grâce à l'azote dégradable de l'aliment.
- Protéines Digérées dans l'Intestin grâce à l'Energie (PDIE) : il s'agit des protéines d'origines alimentaires non digérées par le rumen mais digérées dans l'intestin, ainsi que des protéines potentiellement synthétisées par les micro-organismes ruminiaux grâce à l'énergie fermentescible de l'aliment.
- Cellulose Brute (CB) : dosée par la méthode de Weende
- Cendres insolubles
- Minéraux : potassium (K), phosphore (P), sodium (Na), calcium (Ca), magnésium (Mg)

1.2.2 Analyse statistique

i Principe

Des tests d'analyse de variance (ANOVA = analysis of variance) ont été réalisés avec le logiciel Systat afin de savoir si les facteurs de variation étudiés (numéro de coupe, année, fertilisation avec ou sans Bactériolit®) entraînaient une différence significative.

ii Effet année et numéro de coupe

Les résultats de l'analyse de variance concernant les facteurs année et numéro de coupe sont présentés dans les tableaux 8 et 9 ci-dessous. Les effets de l'année de récolte et du numéro de coupe étaient significatifs (p -value $< 0,05$) pour tous les paramètres étudiés.

Paramètre	Valeur moyenne				p-value
	2008	2009	2010	2011	
MAT (g/kg MS)	126	112	88	111	0,000
PDI (g/kg MS)	88	86	75	84	0,006
UFL	0,95	0,93	0,88	0,92	0,004
UFV	0,91	0,89	0,83	0,87	0,008
PDIN (g/kg MS)	139	127	106	126	0,000
PDIE (g/kg MS)	112	106	94	105	0,000
CB (%)	25	26	24	25	0,001
Cendres insolubles (%)	9,11	9,22	7,83	7,33	0,000
K (g/kg MS)	28,4	27,9	22,7	24,8	0,000
P (g/kg MS)	4,0	4,7	3,7	3,8	0,000
Na (g/kg MS)	1,6	1,4	1,1	1,3	0,000
Ca (g/kg MS)	8,0	8,8	14,3	5,1	0,000
Mg (g/kg MS)	3,0	3,4	6,4	2,4	0,000

Tableau 8 : Etude statistique des analyses chimiques des fourrages : valeur moyenne de tous les paramètres pour chaque année et p-value associée

Concernant les années étudiées, c'était en 2008 que les fourrages récoltés étaient les plus riches au vu de leur analyse chimiques : ils étaient plus riches en MAT et en PDI et avaient des valeurs UFL et UFV supérieures à celles des fourrages récoltés les autres années. C'était en 2009 que la teneur moyenne en CB a été la plus élevée. Les fourrages récoltés en 2010 étaient les plus pauvres en MAT, PDI, mais avaient aussi le plus petit taux de CB.

Paramètre	Valeur moyenne				p-value
	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 3	Coupe 4	
MAT (g/kg MS)	90	91	122	149	0,000
PDI (g/kg MS)	73	76	88	103	0,000
UFL	0,91	0,89	0,91	1,00	0,000
UFV	0,87	0,83	0,87	0,97	0,000
PDIN (g/kg MS)	107	108	136	160	0,000
PDIE (g/kg MS)	97	96	108	122	0,000
CB (%)	27	27	25	20	0,000
Cendres insolubles (%)	8,18	7,81	9,29	8,36	0,000
K (g/kg MS)	29,3	23,6	27,5	23,6	0,000
P (g/kg MS)	3,7	3,7	4,6	4,3	0,000
Na (g/kg MS)	1,0	1,3	1,3	2,0	0,000
Ca (g/kg MS)	5,7	6,8	14,4	7,6	0,000
Mg (g/kg MS)	2,4	2,7	6,0	3,3	0,000

Tableau 9 : Etude statistique des analyses chimiques des fourrages : valeur moyenne de tous les paramètres pour chaque coupe et p-value associée

Les teneurs en matières azotées étaient plus importantes pour les coupes tardives (3 et surtout 4) que pour les premières coupes. Ceci va dans le sens des observations de Delagarde *et al.* (2000) qui avaient noté une teneur en MAT plus importante en octobre qu'en mai et juin. En effet, la distribution verticale des différents constituants chimiques des plantes varie selon le mois et la saison. Au printemps, le taux de MAT diminue fortement avec l'âge des repousses, cette chute est par contre nettement moins marquée en automne (Delagarde *et al.*, 2000).

Il est en revanche plus surprenant d'observer des valeurs énergétiques plus élevées pour les coupes 4 que pour les premières coupes. Les données de la littérature s'accordent sur le fait que la part de glucides cytoplasmique diminue en automne (avec notamment moins de synthèse de glucides lorsque la durée des jours et donc l'activité photosynthétique diminuent) et que le taux de lignine augmente (Wilman *et al.*, 1996, Delagarde *et al.*, 2000). Ceci peut être lié au fait qu'il n'y a pas eu de coupe 4 effectuée pour l'année 2010 lors de l'essai GUMIKO. Or c'était en 2010 que les valeurs énergétiques étaient les plus basses par rapport aux autres années étudiées, ce qui a potentiellement pu faire diminuer ces valeurs pour les coupes 1, 2 et 3, mais n'a pas affecté celles correspondant à la coupe 4.

iii Effet « Bactériolit® »

D'après les résultats de l'analyse de variance, on n'observait de différence significative due au Bactériolit® pour aucun des paramètres à l'exception des cendres insolubles et du potassium (Cf. Tableau 10 ci-dessous).

Paramètre	Valeur moyenne		p-value
	Témoin	Bactériolit®	
MAT (g/kg MS)	110,22	111,44	0,762
PDI (g/kg MS)	84,01	83,77	0,874
UFL	0,93	0,92	0,590
UFV	0,88	0,87	0,687
PDIN (g/kg MS)	125,11	125,82	0,762
PDIE (g/kg MS)	104,97	104,96	0,989
CB (g/kg MS)	25,19	25,53	0,505
Cendres insolubles (%)	7,75	9,07	0,000
K (g/kg MS)	22,04	30,28	0,050
P (g/kg MS)	3,99	3,87	0,377
Na (g/kg MS)	1,73	1,00	0,908
Ca (g/kg MS)	12,30	15,60	0,862
Mg (g/kg MS)	2,35	1,92	0,108

Tableau 10 : Etude statistique des analyses chimiques des fourrages : valeur moyenne de tous les paramètres pour chaque modalité (témoin et Bactériolit®) et p-value associée

Les cendres se trouvaient en quantités plus importantes avec la modalité Bactériolit® que dans les témoins comme on peut l'observer sur la figure 11 ci-après.

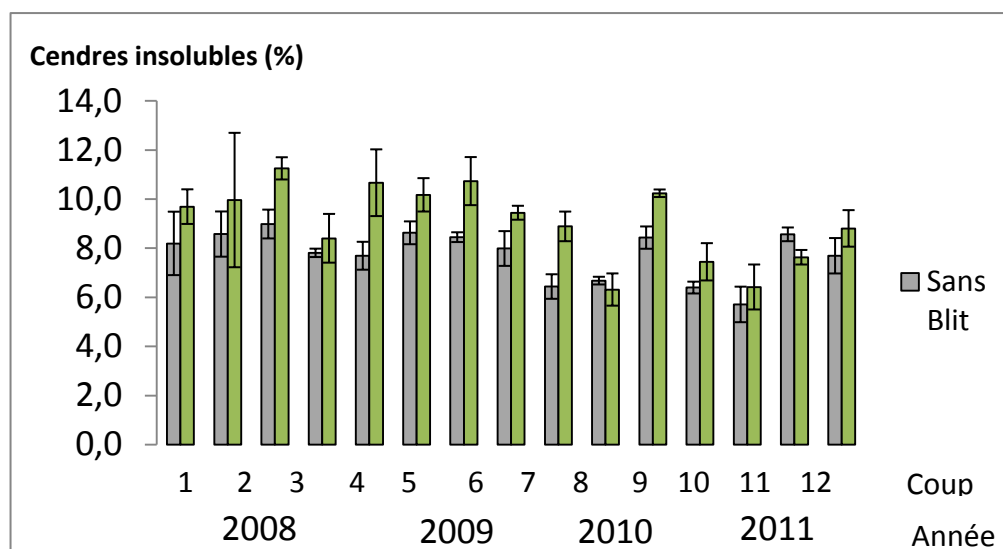


Figure 11 : Graphique représentant les quantités de cendres obtenues pour chacune des modalités sur 4 années

Les éléments minéraux nécessaires dans l'alimentation animale peuvent se diviser en deux groupes (Coordination INRAP, 1984, Meschy & Guégen, 1995). Premièrement la classe des macro-éléments (99% des éléments minéraux de l'organisme) regroupe le calcium, le phosphore, le magnésium, le potassium, le sodium, le chlore, le soufre. Vient ensuite le groupe des oligo-éléments qui comprend, entre autres le fer, le cuivre, le manganèse, le zinc, le sélénium, le cobalt, l'iode, qui sont présents en très faibles quantités (éléments traces). Les cendres insolubles comprennent les macro et oligo-éléments présents sous forme non soluble dans l'acide chlorhydrique ainsi que des traces d'argiles, de limons et de sables. Comme les fourrages testés ont poussé sur un même terrain et ont été récoltés au même moment et de la même façon, la différence au niveau de la teneur en cendres insolubles doit s'expliquer par des teneurs différentes en minéraux.

L'analyse de variance n'a pas révélé d'effet significatif du au Bactériolit® concernant les paramètres P, Na, Ca, et Mg. Par contre, une différence à la limite du taux de significativité a été observée concernant le potassium. D'après les valeurs des analyses chimiques, la teneur des fourrages en potassium est plus élevée dans les fourrages cultivés avec la modalité Bactériolit® (Cf. Figure 12 ci-après).

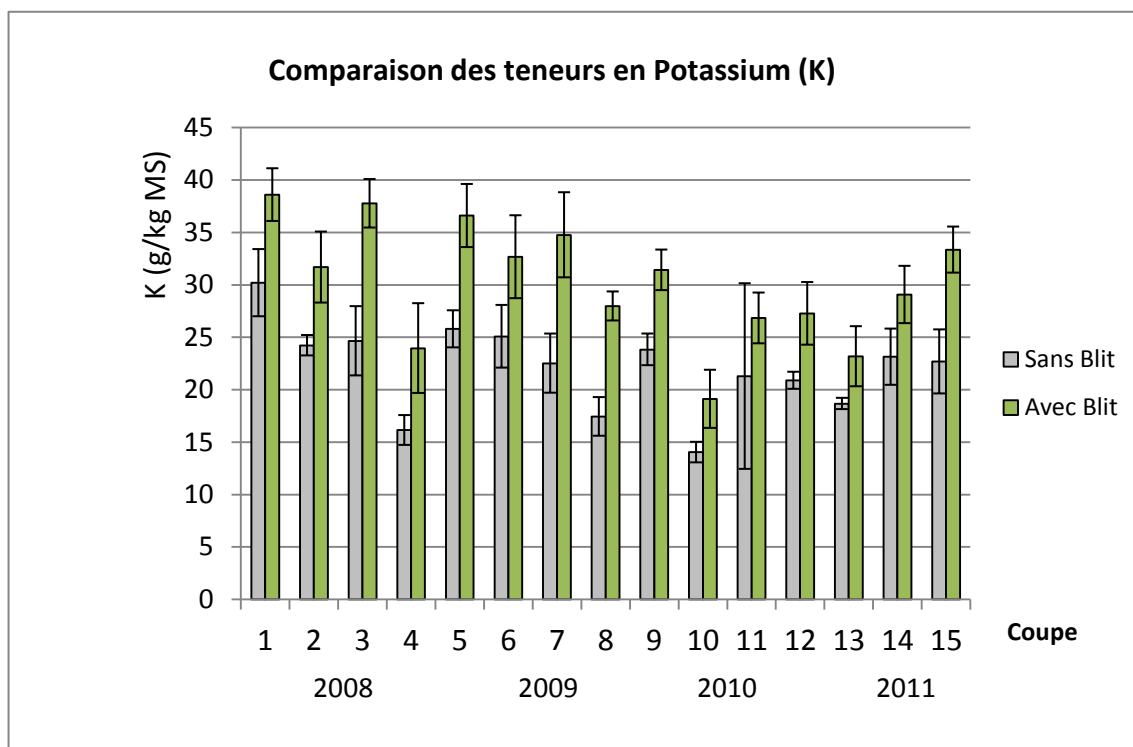


Figure 12 : Graphique représentant les teneurs en potassium obtenues pour chacune des modalités sur 4 années

1.3 Etude in sacco

Chez les ruminants, les différences de comportement de digestion des aliments se manifestent surtout au niveau du rumen. Cette étude visait à comparer les cinétiques de digestion entre fourrage témoin et fourrage Bacteriolit® grâce à des vaches munies d'une canule ruminale. Ceci eut lieu au domaine expérimental de Borret, et au laboratoire ENVT de l'UMR TANDEM.

A partir de ces cinétiques de dégradation il fut possible de calculer la Dégradabilité Théorique (DT) pour les paramètres étudiés (CB et MAT). Chaque mesure comportait quatre points de cinétique (6, 12, 24 et 48h), avec 2 ou 3 répétitions (selon les quantités d'échantillons disponibles) pour chaque point de cinétique.

1.3.1 Protocole général

L'expérience a été réalisée selon la méthode de Michalet-Doreau *et al* (1987), elle consistait à mettre en incubation dans le rumen des sachets dans lesquels se trouvaient les substrats étudiés et à mesurer l'évolution des quantités de CB et de MAT en fonction du temps. En voici les étapes :

- mise en sachets nylon de 11 x 6 cm, de 50 microns de taille de pores : 3 grammes d'échantillon par sachet,
- durées d'incubation 6, 12, 24, 48 heures,
- 3 répétitions par échantillon et durée d'incubation,
- lavage grossier sous robinet des sachets après incubation puis congélation
- décongélation et lavage des sachets (deux lavages successifs en machine),
- séchage à l'étuve (45°C) et pesée des résidus,
- broyage des résidus : broyeur a bille Dangoumau,

Puis :

- dosage de la cellulose brute (méthode de Weende)
- dosage de l'azote (méthode Dumas)

La phase d'expérimentation in vivo a été réalisée en deux séries sur 15 jours. Lors de la première semaine ont été incubés les échantillons T1 à T6 et B1 à B6. La semaine suivante, les sachets contenant les échantillons T7 à T11 et B7 à B11 ont été mis en place.

Pour cet essai, trois vaches taries ont été utilisées : Buzer, Vénus et Bécassine. Cependant pour les échantillons T4, C4, T9, B9, T10, B10, T11, B11 les quantités plus faibles de poudre disponible ont permis d'utiliser seulement deux vaches (Buzer et Bécassine). Ces bovins vivaient en stabulation libre et recevaient la ration suivante (en kg bruts par jour) :

Ensilage de maïs	15,0
Foin	à volonté, estimé à 7 kg
Tourteau de soja 48	1,0
A.M.V.	0,100

Tableau 11 : Ration des vaches donneuses (kg de matière brute)

1.3.2 Dosage de la cellulose brute : méthode de Weende

i Principe

La CB ou cellulose de Weende est la Matière Organique (MO) insoluble en milieu acide et alcalin et exempte de graisse. Elle s'exprime en % en masse, rapporté soit au produit brut soit à sa Matière Sèche (MS). Les dosages ont été réalisés selon la méthode de Weende (1860).

Après avoir été broyé, chaque échantillon était traité par une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄ 1.25 %, soit 6.9 ml de H₂SO₄ qsp 1 l d'eau) portée à ébullition. Le résidu était ensuite filtré et lavé, puis il était traité par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH 1.25 %, soit 12.50 g de NaOH qsp 1 l d'eau) portée à ébullition. Enfin, le résidu était filtré, lavé, rincé à l'acétone, lavé, soumis à dessiccation puis pesé avant d'être incinéré pour déterminer sa perte de masse. Celle-ci correspond à la teneur en Cellulose Brute (CB) : homopolysaccharide de glucoses en liaisons β 1-4, il s'agit du principal glucide structural des parois des cellules végétales.

ii Protocole

- Dans un creuset de porosité 2, peser 1 g d'échantillon à 0,001 g près.
- Ajouter 100 ml de solution d'acide sulfurique bouillante, porter à ébullition rapidement et maintenir une ébullition douce pendant 30 min. Arrêter le chauffage, filtrer, laver 3 fois à l'eau chaude.
- Ajouter 100 ml de solution de soude bouillante et faire bouillir à nouveau 30 min. comme précédemment.
- Arrêter le chauffage, filtrer immédiatement, laver 3 fois à l'eau chaude.
- Ajouter l'acétone, laisser agir 2 min., filtrer puis sécher le résidu à l'étuve à 103 °C jusqu'à poids constant.
- Refroidir dans un dessiccateur, peser P1, puis incinérer dans le four à 550 °C pendant 2 heures,
- Laisser refroidir dans un dessiccateur et peser P2.

iii Calcul

$$CB \text{ g/kg} = \frac{(P1-P2) \times 1000}{Pe}$$

Avec :

P1 : masse après séchage à l'étuve

P2 : masse après incinération

Pe : masse de la prise d'essai

1.3.3 Dosage de l'azote total : méthode de Dumas

Cette méthode permet de doser l'azote total.

* Préparation des échantillons :

Après l'étape de broyage, 130 mg \pm 1mg de chaque échantillon ont été pesés et placés dans une petite capsule d'étain. Ils ont ensuite été transférés au laboratoire de l'INRA où s'est déroulée la suite des opérations.

* Dosage :

- Les capsules d'étain contenant chacune un échantillon étaient introduites dans un réacteur constitué par un tube vertical en quartz maintenu à la température de 1000°C et dans lequel passait un courant d'hélium. Lors de l'introduction d'un échantillon, la combustion éclair de la capsule et de l'échantillon était provoquée par un enrichissement du courant d'hélium en oxygène.
- Les gaz de combustion entraînés par le courant d'hélium passaient sur un catalyseur d'oxydation qui les transforme en CO₂, H₂O, SO₂, SO₃, N_xO_y....
- Ces gaz passaient alors sur un deuxième catalyseur (cuivre réduit) qui réduisait les oxydes d'azote en azote élémentaire, le SO₃ en SO₂ et pièger l'excès d'oxygène. A la sortie du tube, on trouvait en plus du gaz vecteur hélium, les gaz N₂, SO₂, CO₂ et H₂O. Les produits non dosés étaient piégés.
- Les gaz obtenus étaient alors séparés dans une colonne de chromatographie et quantifiés par un détecteur à conductibilité thermique. Le signal obtenu était amplifié puis traité informatiquement.

1.3.4 Cinétique de dégradation in sacco : modèle mathématique

Le modèle mathématique de la dégradation ruminale des différents constituants des aliments (Orskov et McDonald, 1979) est représenté par l'équation suivante :

$$D = a + b (1 - \exp(-c (tps - l)))$$

Avec :

- D : % de dégradation par rapport à l'échantillon initial
- a : fraction soluble, immédiatement dégradée, en %
- b : fraction progressivement dégradé (en %), à une vitesse « c » (par heure)
- c : vitesse de dégradation de la fraction potentiellement dégradable « b »
- l : temps de latence (heures)
- tps : durée d'incubation (h)

Les constantes de cette équation ont pu être estimées avec le logiciel Systat pour la CB et les MAT. Il a ensuite été possible de calculer la Dégradabilité Théorique (DT) (Cf. Figure 13 ci-dessous) qui correspond au % total de dégradation de l'élément étudié en utilisant la formule ci-dessous.

$$DT = a + b * c / (c + kp)$$

La somme a+b correspond à la quantité de CB ou de MAT qui pourrait être dégradée dans le rumen, si le temps de présence de l'aliment dans le rumen était suffisamment long. La constante kp correspond au taux de sortie du rumen, il est estimé à 6% par heure. La DT estime le % de CB ou de MAT dégradé dans rumen pour une durée de séjour dans le rumen correspondant à une probabilité de sortie de 6% par heure.

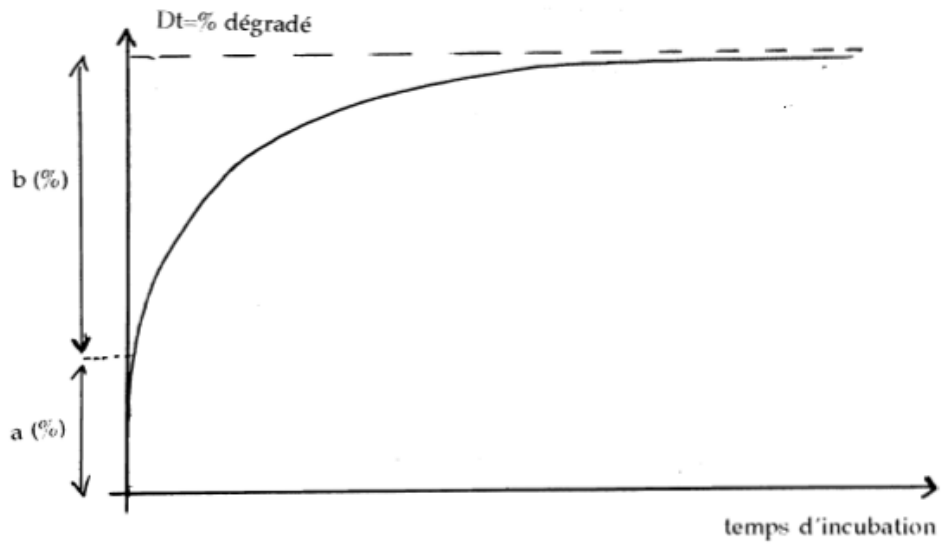


Figure 13 : Courbe de dégradation in sacco des constituants alimentaires dans le cas où il n'y a pas de temps de latence

2 Résultats

2.1 Allure générale des courbes de dégradation de la CB et des MAT

Les graphiques correspondant aux pourcentages de dégradation en fonction du temps d'incubation ont été réalisés pour chaque paramètre (CB et MAT), chaque coupe et chaque modalité (Cf. Annexes 2, 3 et 4). Les figures 14 et 15 ci-après représentent les courbes de dégradation globale de la CB et des MAT, obtenues en faisant la moyenne pour chaque temps d'incubation des % dégradés, pour les 11 coupes et les trois vaches. Une analyse de variance a ensuite été effectuée avec ces données (Cf II- 2.1.2).

L'allure des courbes suggérait que la dégradation de la CB et des MAT avait débuté dès l'introduction du sachet à l'intérieur du rumen. Il ne semblait donc pas y avoir de temps de latence (temps de colonisation de la matière par les bactéries ruminales sans digestion associée). Ceci était conforme avec les données de la bibliographie qui indiquent un temps de latence $l=0$ pour les MAT (Michalet-Doreau & Aufrère, 1990). En revanche un phénomène d'adhésion bactérienne peut parfois entraîner un temps de latence pour la dégradation de la CB (Sauvant & Van Milgen, 1995) (Cf. I.1.1.3).

Trois points aberrants ont été mis en évidence par le tracé de ces courbes. Le premier était celui qui correspondait à une valeur anormalement élevée du % de CB dégradée (71,7%) pour la vache Buzer, l'échantillon T4 après un temps d'incubation de 6h. Les deux autres correspondaient à une valeur anormalement élevée de CB et de MAT dégradées (respectivement 70,35% et 85,19%) pour la vache Vénus, l'échantillon B7, après un temps d'incubation de 6h. Ces valeurs étaient difficilement explicables. En effet, pour chacun de ces échantillons le poids résiduel du sachet retiré de la vache (et donc le % de poids sec disparu) était similaire aux valeurs moyennes des autres échantillons, il n'y avait donc pas eu de perte anormale d'échantillon pendant la phase in sacco. Pour l'échantillon T4, la valeur P_e (0,205g) était faible et les cendres obtenues après incinérations avaient une couleur anormalement rouge. Cependant cela avait aussi été le cas pour les autres durées d'incubation de T4 pour

lesquelles les valeurs de % de dégradation de la CB n'étaient pas aberrantes. Ces trois points n'ont pas été pris en compte pour l'étude statistique.

2.1.1 Allure générale de la courbe de dégradation de la CB

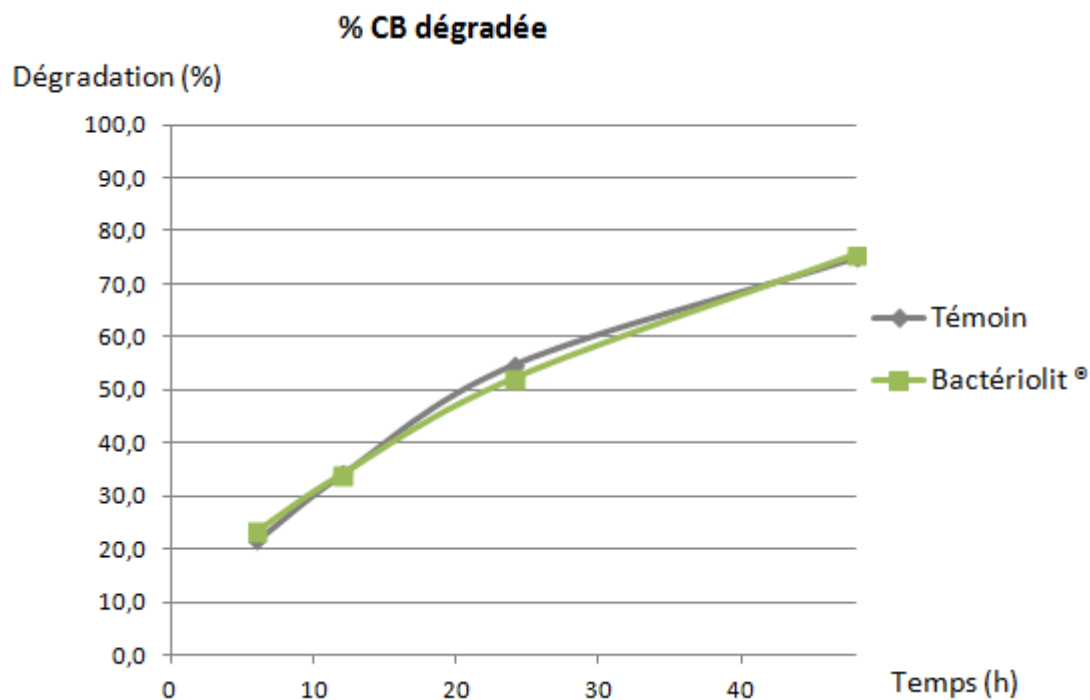


Figure 14 : Graphique représentant les % moyens de CB dégradée (11 coupes, 3 vaches), en fonction du temps d'incubation in sacco (6, 12, 24 et 48 heures)

D'après le graphique représenté sur la figure 14, les courbes de dégradation de la CB des fourrages témoin et Bactériolit® étaient très proches.

2.1.2 Allure générale de la courbe de dégradation des MAT

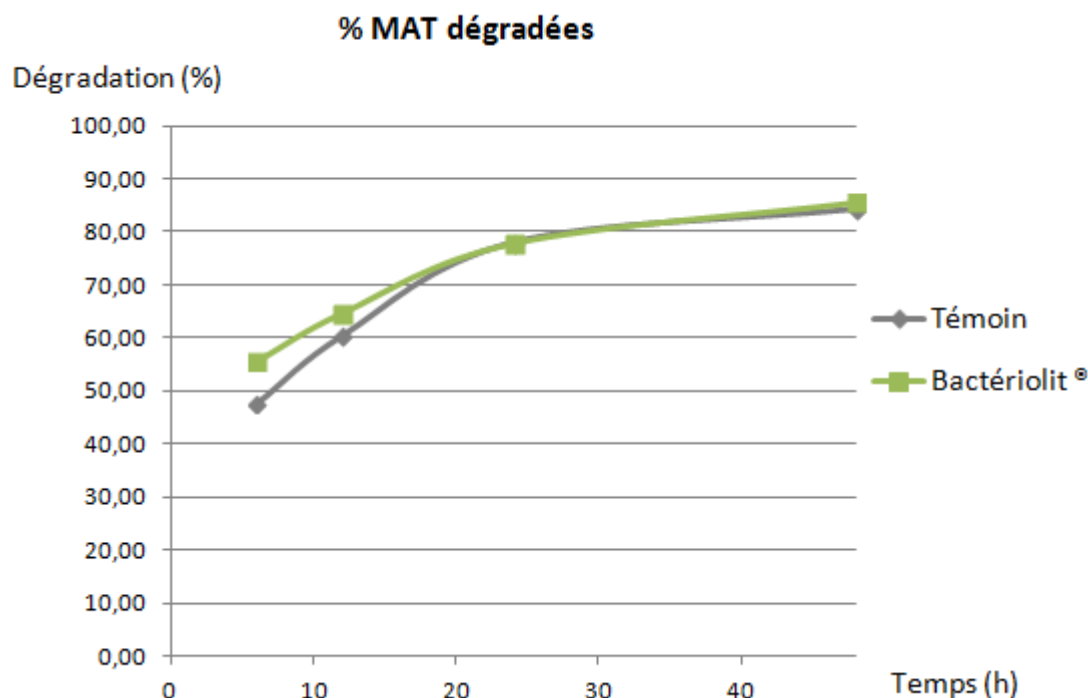


Figure 15 : Graphique représentant les % moyens de MAT dégradées (11 coupes, 3 vaches), en fonction du temps d'incubation in sacco (6, 12, 24 et 48 heures)

D'après la figure 15 ci-dessus, il est notable que le taux de dégradation des MAT était plus élevé pour les fourrages Bactériolit® que pour les fourrages témoins lors des premières heures d'incubation in sacco (notamment aux points correspondant à 6 et 12 h). Les courbes étaient ensuite confondues pour les temps d'incubation suivants.

2.2 Analyse statistique

Les valeurs obtenues pour les % de dégradation au cours du temps pour la CB d'une part et pour les MAT d'autre part ont fait l'objet de tests d'analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel Systat. Ces tests ont été réalisés pour chaque temps d'incubation (6, 12, 24 et 48h), en utilisant les facteurs année (2009, 2010, 2011), coupe (1, 2, 3, 4), vache (Bécassine, Buzzer, Vénus), modalité (témoin ou Bactériolit®).

CB	p-value			
	Coupe	Année	Vache	Modalité
6 h	0,004	0,004	0,176	0,406
12 h	0,248	0,000	0,000	0,691
24 h	0,004	0,014	0,148	0,486
48 h	0,000	0,002	0,080	0,608
MAT	p-value			
	Coupe	Année	Vache	Modalité
6 h	0,169	0,000	0,065	0,001
12 h	0,573	0,000	0,000	0,059
24 h	0,011	0,217	0,610	0,954
48 h	0,011	0,479	0,311	0,228

Tableau 12 : Résultats de l'ANOVA concernant la dégradation de la CB (tableau du haut) et des MAT (tableau du bas) en fonction des paramètres coupe, année, vache et modalité (témoin ou Bactériolit®) pour les temps d'incubation de 6, 12, 24 et 48h.
Les cases surlignées en jaune correspondent à un effet significatif ($P < 0,05$).

2.2.1 Effet Bactériolit®

i Sur la dégradation de la CB

Aucune différence significative due au facteur Bactériolit® n'a été observée concernant la dégradation de la CB. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 13 ci-dessous. Ceci était cohérent avec l'allure de la courbe générale de dégradation de la CB (Cf. II-2.1.1 et figure 14).

Dégradation CB	% moyen de dégradation	
	Tps d'incubation	Témoin
6 h	19,3	20,5
12 h	34,3	33,7
24 h	55,3	53,6
48 h	75,0	75,7

Tableau 13 : % moyen de dégradation de la CB pour les temps d'incubation de 6, 12, 24 et 48h, pour les modalités témoin et Bactériolit®

ii Sur la dégradation des MAT

Une différence très significative entre les échantillons témoin et Bactériolit® a été observée pour la durée d'incubation 6 heures (Cf. tableau 14 ci-dessous). A 12h d'incubation, l'effet Bactériolit® était proche de la significativité. Pour les autres temps d'incubation,

aucune différence significative n'a été mise en évidence. Ceci était en accord avec l'allure générale de la courbe de dégradation des MAT (Cf. II-2.1.1 et figure 15).

Dégradation MAT	% moyen de dégradation	
	Témoïn	Bactériolit
Tps d'incubation		
6 h	48,2	53,8
12 h	61,0	64,6
24 h	78,8	78,9
48 h	84,7	86,1

Tableau 14 : % moyen de dégradation de la MAT pour les temps d'incubation de 6, 12, 24 et 48h, pour les modalités témoïn et Bactériolit®

2.2.2 Effets coupe et année

Les facteurs coupe et année avaient un effet significatif pour quasiment tous les temps d'incubation concernant la CB, et dans la moitié des cas pour les MAT (Cf. Tableau 13 ci-avant). Ceci peut être mis en lien avec le fait que les facteurs coupe et année avaient un effet significatif sur tous les paramètres de l'analyse chimique des fourrages testés (Cf.II.1.2.2).

Les dégradations de la CB et des MAT obtenues pour les coupes 4 et 1 étaient plus élevées que celles obtenues pour les coupes 2 et 3. Concernant les années, les dégradations de la CB et des MAT étaient les plus faibles pour l'année 2010, les valeurs obtenues pour les années 2009 et 2011 étaient plus proches mais généralement plus importantes en 2009. L'écart entre les dégradations de la CB pour les années 2009 et 2010 était de 6% pour la durée d'incubation de 48h. Le % de dégradation des MAT à 48 h d'incubation in sacco obtenu pour l'année 2009 était supérieur de 1,5% à celui correspondant à l'année 2010.

2.2.3 Effet vache

Le facteur « vache » présentait un effet significatif pour le temps d'incubation de 12h, pour la CB et les MAT (Cf. Tableau 13). Dans les deux cas, la dégradation était plus élevée chez Bécassine, suivie de Buzer puis Vénus. Cette tendance était observable pour d'autres temps d'incubation pour la CB et les MAT, sans entraîner de différence significative.

2.3 Calcul des paramètres de dégradation et modélisation mathématique

2.3.1 Calcul des paramètres de dégradation de la CB

Pour la cellulose brute, la fraction immédiatement dégradée a été considérée comme nulle ($a=0$) (Cf I.1.1.3, (Michalet-Doreau & Aufrère, 1990, Sauvart & Van Milgen, 1995). L'équation de la courbe de dégradabilité de la CB (DegCB) était donc de la forme :

$$\text{DegCB} = b \cdot \exp(1-c \cdot (t-l))$$

Une première série de calculs a donné une constante $l=0$. Le temps de latence pour la dégradabilité de la CB était donc nul dans le cadre de cette étude in-sacco. L'équation précédente pouvait donc s'exprimer sous la forme :

$$\text{DegCB} = b \cdot \exp(1-c \cdot t)$$

La variation due au facteur Bactériolit a été calculée en introduisant les constantes b_1 et c_1 :

$$\text{DegCB} = (b+b_1 \cdot \text{BACT}) \cdot (1-\exp(-(c+c_1 \cdot \text{BACT}) \cdot t))$$

Avec:

- b et c : valeurs des constantes pour le témoin
- b_1 et c_1 : variation de la valeur des constantes b et c due au facteur Bactériolit®

Il est possible de voir sur le tableau 15 ci-dessous que les intervalles de confiance de b1 et c1 contenaient tous deux la valeur zéro. Cela signifie que la présence de Bactériolit® ne modifie pas significativement (au seuil 5%) les paramètres de dégradation de la CB.

Paramètre	Valeur	Ecart-type	Intervalle de confiance	
			Minimum < 95%>	Maximum
B	86.0237	3.4293	79.2625	92.7848
B1	0.1725	5.0582	-9.8002	10.1452
C	0.0425	0.0034	0.0358	0.0493
C1	-0.0008	0.0049	-0.0104	0.0089

Tableau 15 : Résultats obtenus avec le logiciel Systat pour le calcul des paramètres de dégradation de la CB b et c, ainsi que la variation de ces paramètres due au Bactériolit® (b1 et c1)

Les DT calculées avec ces valeurs étaient de 35,7% pour les fourrages témoins, et de 35,3% pour les fourrages cultivés avec Bactériolit®.

2.3.2 Calcul des paramètres de dégradation des MAT

L'équation de la courbe de dégradation des MAT (DegMAT) était de la forme :

$$\text{DegMAT} = a + b \cdot \exp(1-ct)$$

La variation due au facteur Bactériolit® a été calculée en introduisant les constantes a1, b1 et c1 :

$$\text{DegMAT} = a + a1 \cdot \text{BACT} + (b + b1 \cdot \text{BACT}) \cdot (1 - \exp(-(c + c1 \cdot \text{BACT}) \cdot t))$$

Avec:

- a, b et c : valeurs des constantes pour le témoin
- a1, b1 et c1 : variation de la valeur des constantes a, b et c due au facteur Bactériolit®

Paramètre	Valeur	Ecart-type	Intervalle de confiance	
			Minimum < 95%	Maximum
A	23.7759	4.7809	14.3519	33.1999
A1	14.5370	6.2991	2.1204	26.9536
B	62.3562	4.0713	54.3310	70.3815
B1	-12.8146	5.2287	-23.1212	-2.5079
C	0.0784	0.0111	0.0565	0.1002
C1	-0.0133	0.0165	-0.0457	0.0192

Tableau 16 : Résultats obtenus avec le logiciel Systat pour le calcul des paramètres de dégradation des MAT a, b et c, ainsi que la variation de ces paramètres due au Bactériolit® (a1, b1 et c1)

D'après les résultats obtenus (Cf. Tableau 16 ci-dessus), les intervalles de confiance de a1 et b1 ne contenaient pas la valeur zéro et celui de c1 contenait zéro. Cela signifie que pour les fourrages traités avec du Bactériolit®, la part de MAT immédiatement dégradée (a) augmentait, inversement la part de MAT progressivement dégradées (b) diminuait, mais sa vitesse de dégradation (c) n'était pas modifiée de façon significative.

Les DT calculées à partir de ces résultats étaient de 59,1% pour les fourrages témoins, et de 64,1% pour les fourrages cultivés avec Bactériolit (Cf. Tableau 17 ci-dessous).

Paramètres		a	b	c	DT
CB	Témoin	0	86,0	0,0425	35,7
	Bactériolit	0	86,2	0,0417	35,3
MAT	Témoin	23,8	62,4	0,0784	59,1
	Bactériolit	38,3	49,5	0,0651	64,1

Tableau 17 : Synthèse des constantes de dégradation in sacco obtenues pour la CB et les MAT avec des fourrages cultivés avec ou sans Bactériolit®

3 Interprétation et discussion

3.1 Analyse chimique des fourrages

3.1.1 Valeurs énergétiques et protéiques

Une synthèse des données obtenues lors de l'essai GUMIKO entre 2004 et 2009 pour les 15 modalités de fertilisation a montré que la modalité Bactériolit® + fumier 170 uN est celle qui apporte la plus grande quantité de matière sèche récoltée par unité d'azote total (Cf. I.2.2.5). Avec ces rendements en matière sèche plus importants, il serait possible qu'un facteur dilution au niveau des constituants majeurs des fourrages soit observé. Or l'analyse des compositions chimiques des fourrages Bactériolit® et témoin n'a montré aucune différence significative. Ceci est en accord avec les observations effectuées lors de l'essai GUMIKO (Cf.I.2.2.5). En effet si on compare le mode Bactériolit® + fumier 170 uN et le témoin choisi dans cette étude (fumier 170 uN seul), le rendement moyen en énergie est respectivement de 8114 UFL/Ha contre 7302 UFL/Ha et le rendement moyen en protéines est respectivement de 1255 kg MAT /Ha contre 1188 kg MAT/Ha pour le témoin.

3.1.2 Teneur des fourrages en minéraux

Dans le chapitre 1.2.2 il a été noté des différences entre fourrages témoins et Bactériolit® concernant les teneurs en certains minéraux. Les fourrages Bactériolit® sont globalement plus riches en minéraux et cette différence semble s'expliquer par une plus forte teneur en potassium (K) chez ces derniers. Les fourrages ont une forte teneur en K (entre 10 et 40 g/kg MS) (Coordination IRAP, 1984, Valarcher *et al.*, 1995). Les teneurs en K des fourrages de cette étude sont en accord avec ces données. En dehors des apports extérieurs, la teneur en potassium dépend de plusieurs facteurs dont le stade de maturité de la plante : plus les plantes sont récoltées jeunes, plus elles sont riches en cet élément (Valarcher *et al.*, 1995). La nature des végétaux composant le fourrage est également influente : les fourrages de légumineuses sont plus riches en potassium que ceux de graminées (Valarcher *et al.*, 1995). Or lors de l'essai GUMIKO, il n'y a pas eu d'observation d'une augmentation de la

population de légumineuses avec la modalité Bactériolit®. Cette plus forte teneur en potassium chez les fourrages Bactériolit® par rapport aux fourrages témoins n'est donc probablement pas due à une modification de flore des prairies. Elle pourrait être liée à une maturité moins importante des végétaux cultivés avec Bactériolit® par rapport aux témoins lors de la récolte. Cette différence observée entre fourrages Bactériolit® et témoin au niveau du potassium ne permet néanmoins pas d'expliquer une éventuelle différence au niveau de la valorisation des plantes.

3.2 Dégradation de la CB et des MAT

Les cinétiques de dégradation ruminale et les dégradabilités théoriques de la CB et des MAT ont été obtenues via la méthode in sacco. Cette dernière permet d'étudier la digestibilité in vivo en plaçant dans le rumen des sachets en Nylon contenant les échantillons à tester et de les retirer au bout d'une durée déterminée. Cependant, cela ne permet pas de reproduire exactement la digestion comme elle aurait lieu suite à l'ingestion directe des fourrages étudiés. En effet les échantillons ont été broyés avant la mise en sachet et l'incubation ruminale. Il n'y a donc pas de prise en compte de l'appétence et de la forme de l'aliment initial ni des phases de mastication et de rumination (Michalet-Doreau & Aufrère. 1990). De plus, une fuite de substrat à travers les mailles du sachet est possible et peut fausser les résultats car elle peut être considérées par la suite comme une dégradation.

Une des grandes difficultés rencontrée lors de ce travail de thèse a été le manque d'échantillons. En effet pour les coupes T4, C4, T9, B9, T10, B10, T11, et B1 la dégradation n'a pu être étudiée que chez deux vaches au lieu de trois. En outre, le poids Pe mesuré avant le dosage de la CB a été inférieur à 0,5g pour certains échantillons.

3.2.1 Dégradation de la CB

i Choix du paramètre CB

Le paramètre CB a été choisi afin de refléter la dégradabilité de la Matière Organique (dMO) des fourrages et ainsi leur valeur énergétique. En effet, la teneur en énergie nette des fourrages varie selon la dégradabilité de leur énergie brute, qui dépend de la dMO, laquelle dépend largement de la dégradation ruminale de la CB dans les fourrages.

L'étude de la dégradation de la CB a été choisie par souci de représentativité car il s'agit d'une base essentielle dans l'alimentation animale pour estimer la valeur nutritive des aliments.

Cependant les hydrolyses réalisées dans cette méthode peuvent léser une partie des parois des cellules végétales. La CB comprend en réalité la cellulose vraie, plus une partie de la lignine et des hémicelluloses de l'aliment ainsi qu'un peu de pectine (Enjalbert, 1996). Malgré tout, sur le plan fonctionnel, il existe une bonne corrélation entre le taux de CB et la digestibilité des aliments. D'autres méthodes permettent de déterminer plus précisément les différents constituants de la paroi végétale comme par exemple la méthode de Van Soest qui permet en particulier de discriminer cellulose vraie, hémicelluloses et lignine.

ii Dégradation de la CB en fonction du facteur Bactériolit®

Comme le montrent les résultats présentés dans la partie 2.2.1, aucune différence significative au niveau des paramètres de digestibilité entre les fourrages témoins et les fourrages Bactériolit® n'avait été observée. Les DT calculées étaient similaires avec des valeurs de 35,7 % pour les fourrages témoins, et de 35,3 % pour les fourrages cultivés avec Bactériolit®. Ces résultats ne permettent pas d'expliquer les meilleures performances rapportées chez les bovins consommant des fourrages cultivés avec du Bactériolit® par une différence au niveau de la dégradabilité des glucides pariétaux et est cohérent avec l'absence de différence entre valeurs énergétiques.

3.2.2 Dégradation des MAT

i Choix du paramètre MAT

Les MAT ont été étudiées afin de refléter la valeur azotée des fourrages. Cependant, avec la méthode in sacco, il a été montré qu'il existe une sous-estimation de la dégradabilité des matières azotées (Michalet-Doreau & Aufrère, 1990). En effet, une partie de l'azote résiduel présent dans le sachet après incubation correspond à de l'azote bactérien lié à la colonisation du résidu par les bactéries ruminales (Varvikko & Lindberg, 1985).

ii Dégradation des MAT en fonction du facteur Bactériolit®

Pour les fourrages traités avec du Bactériolit®, la part de MAT immédiatement dégradée augmente, inversement la part de MAT progressivement dégradées diminue et la vitesse de dégradation reste quant-à elle inchangée par rapport aux fourrages témoins (Cf.2.2.2). Finalement les DT calculées à partir de ces résultats sont plus élevées pour les fourrages cultivés avec Bactériolit® (64,0 %) que pour les fourrages témoins (59,1 %).

Cette différence observée au niveau de la dégradation des MAT peut être due à une différence de composition des plantes fourragères en constituants azotés. La dégradabilité des matières azotées dépend principalement de leur solubilité dans le liquide ruminal. Leur dégradabilité dépend de leur structure, de leur accessibilité aux enzymes et éventuellement de la présence de composés pouvant diminuer la solubilité des protéines dans le rumen (tannins) ou bien diminuer leur dégradation (polyphénols, oxydase) (Vignau-Loustau & Huyghe, 2008). Parmi les matières azotées, on distingue l'Azote Non Protéique (ANP) de l'azote protéique. L'ANP (amines, nucléotides, acides aminés libres) constitue 15 à 25% de l'azote des fourrages verts. Cette fraction est soluble et directement utilisable par les microorganismes du rumen. La teneur en ANP des plantes est variable selon les paramètres environnementaux, elle augmente notamment avec la fertilisation azotée (Vignau-Loustau & Huyghe, 2008). Les constituants azotés protéiques sont répartis en deux groupes : protéines insolubles et solubles. Les protéines insolubles sont majoritaires (65%), seulement une partie d'entre elles pourra être dégradée par les micro-organismes du rumen. Les protéines solubles

(35%) sont quant-à elles rapidement dégradables dans le rumen. Les résultats obtenus pour la dégradabilité des MAT avec une part immédiatement dégradée supérieure pour les fourrages Bactériolit® peuvent suggérer qu'avec cette modalité la part d'ANP ou de protéines solubles est augmentée. Une étude complémentaire concernant la nature des différents constituants azotés présents dans les fourrages cultivés avec cette modalité pourrait être intéressante pour comprendre l'origine des différences de dégradation des MAT.

La part d'azote soluble est en général plus importante chez les plantes jeunes. Lors de l'essai GUMIKO tous les fourrages ont été récoltés au même moment. Ceci pourrait laisser penser que les fourrages Bactériolit® avaient un stade physiologique plus précoce que les fourrages témoins lors de la récolte. Or les plantes jeunes ont une teneur en MAT plus importante que les plantes âgées (Vérité & Peyraud, 1988), et aucune différence significative au niveau des MAT n'a été observée dans les analyses chimiques des fourrages témoin et Bactériolit®. Une éventuelle modification de la vitesse de maturation des plantes en présence de Bactériolit serait intéressante à étudier.

Cette dégradation rapide des MAT modifie l'équilibre entre PDIE et PDIN au profit des PDIN. Cela peut conduire à une formation excessive d'ammoniac dans le rumen suite à un dépassement des capacités de protéosynthèse des micro-organismes ruminants qui sont limitées par un manque d'énergie provenant des glucides. Une partie de cet ammoniac peut rejoindre le sang veineux via la paroi du rumen et atteindre le foie où il peut être métabolisé en urée. En cas d'excès chronique, cela peut entraîner une surcharge hépatique avec diminution de la néoglucogénèse et risque de diffusion du NH₃ (Sauvant et al. 2001). Cependant, l'écart de 5% entre les DT des MAT observées dans cette étude ne laisse pas craindre de telles conséquences chez les bovins consommant des fourrages cultivés avec du Bactériolit®. Cependant, grâce à cette observation, il pourrait être judicieux d'équilibrer les rations en ajoutant à de tels fourrages des aliments riches en PDIE, ce qui favoriserait une utilisation optimale de l'azote et de l'énergie, et éviterait une formation trop importante d'ammoniac dans le rumen. Le dosage de l'urémie ou bien l'urée du lait peut être le reflet d'un excès de production d'ammoniac dans le rumen (Cf. I-114). Une étude réalisée en 2006 et 2007 par des équipes d'AgroParisTech a montré que le taux d'urée dans le lait de vaches nourries avec du fourrage de maïs cultivé avec du Bactériolit® était significativement inférieur (de 10%) à celui d'un groupe de vaches témoin. Or, le maïs n'est pas récolté au même stade de maturité et n'a pas la même physiologie de nutrition azotée que les espèces

prairiales. Une étude similaire concernant des vaches consommant des foins de prairies cultivées avec du Bactériolit® serait donc intéressante pour s'assurer qu'il n'y a pas de déséquilibre trop important entre azote et énergie chez ces fourrages.

Un effet du au Bactériolit® sur la dégradabilité des protéines est mis en évidence dans cette étude. Cependant cette différence observée au niveau de la dégradabilité des MAT ne permet pas d'expliquer les meilleures performances rapportées chez les bovins consommant des fourrages cultivés avec Bactériolit®.

CONCLUSION

Des effets positifs ont été rapportés pour la fertilisation Bactériolit® en termes agronomiques et environnementaux. L'effet de ce procédé sur la nutrition animale est quant-à lui plus difficile à objectiver. Cette étude ne permet pas d'expliquer les meilleures performances zootechniques rapportées chez les animaux consommant des fourrages cultivés avec Bactériolit®. En effet, les différences au niveau de la dégradation des MAT ne permettent pas d'arriver à une conclusion. Néanmoins, l'origine des différences observées au niveau de la digestibilité des matières azotées est à étudier. Dans l'hypothèse où l'urémie serait plus basse chez les vaches consommant des foins de prairies cultivées avec du Bactériolit®, comme rapporté sur des vaches consommant de l'ensilage de maïs, une meilleure utilisation des matières azotées serait probable. Elle pourrait-être due à une amélioration au niveau des synthèses protéiques microbiennes qui est difficile à quantifier. Cependant l'ammoniac est rarement un facteur limitant pour ces synthèses et aucune modification concernant la digestion de la CB (et donc de l'énergie disponible dans le rumen) n'a été observée lors de ce travail.

Il existe aussi des contradictions entre les informations du terrain et certaines données de l'essai GUMIKO. Cet essai a permis de démontrer un effet du Bactériolit® sur la productivité des plantes, mais pas d'effet qualitatif. Il est important de citer l'évolution de composition de la flore prairiale qui n'a pas montré d'augmentation de la part des espèces légumineuses en station expérimentale, alors que celle-ci a été rapportée sur le terrain (en corrélation avec l'action de la bactérie *Azotobacter*). Il faut également noter que les observations de terrain se font au cas par cas et ne sont pas toujours reproductibles d'une situation à l'autre, avec des effets plus importants observés sur des sols pauvres ou mal gérés à la base. Il faut donc se demander si la situation de base en station expérimentale où les terres sont bien conduites n'est pas trop optimale pour que l'on puisse observer de réelles différences sur la composition floristique. Il est ainsi envisageable qu'une station expérimentale ne puisse pas toujours représenter ce qui se passe sur le terrain. Pour aller plus

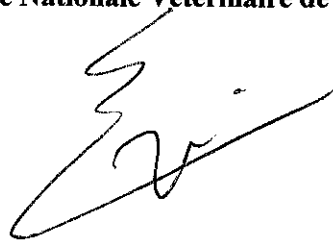
loin dans ce questionnement, il serait possible d'effectuer une étude en sélectionnant un nombre suffisant d'élevages présentant des parcelles mixtes (avec et sans Bactériolit®) et d'y effectuer des relevés floristiques. Des expérimentations sur le terrain prenant en compte un nombre suffisant d'exploitation sont aussi à envisager afin d'aller plus loin dans l'investigation d'un effet « Bactériolit® » sur la capacité d'ingestion et sur l'efficacité de digestion des ruminants.

AGREMENT SCIENTIFIQUE


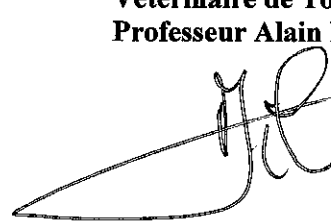
En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire

Je soussigné, **Francis ENJALBERT**, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de **BOYE Marlène** intitulée « *Etude in sacco de la dégradation ruminale des fibres et des matières azotées de fourrages fertilisés avec du fumier traité ou non par du bacteriolit®.* » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

Fait à Toulouse, le 8 janvier 2014
Professeur Francis ENJALBERT
Enseignant chercheur
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse



Vu :
Le Directeur de l'Ecole Nationale
Vétérinaire de Toulouse
Professeur Alain MILON



Vu :
Le Président du jury :
Professeur Robert SALVAYRE

Professeur R. SALVAYRE
Université Paul Sabatier
Laboratoire de Biochimie Médicale
C.H.U. RANGUEIL
1, avenue Jean-Poullhès
31054 TOULOUSE Cedex - FRANCE

Vu et autorisation de l'impression :
Le Président de l'Université
Paul Sabatier
Professeur Bertrand MONTHUBERT

Le Président de l'Université Paul Sabatier
par délégation
Le vice-Président du CEVU

Arnaud LE PADELLEC



Melle **BOYE Marlène**
a été admis(e) sur concours en : 2008
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le : 21/06/2012
a validé son année d'approfondissement le : 27/06/2013
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

BIBLIOGRAPHIE

AGABRIEL J (2007). Alimentation des bovins, ovins et caprins. Tables INRA 2007. *Editions Quae*, p108-109.

AgroParisTech. La fertilisation azotée. Cours en Ligne mis à jour le 23/02/2013. [Consulté le 05/03/2013]. Disponible à partir de : <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/main/document/document.php?cidReq=LAFERTILISATIONAZOTE&curdirpath=/azote>.

ALLAIN E, AUBERT C (2009). Réorganiser l'azote dans le bâtiment par un complexe de microorganismes pour réduire fortement les pertes d'ammoniac en bâtiment et au champ et les pertes par le lessivage de nitrates au champ, en obtenant sans retournement un compost norme, au bénéfice des animaux, de l'économie et de l'environnement. *Huitièmes Journées de la Recherche Avicole, St Malo, 25 et 26 mars 2009*.

ANTONIEWICZ AM, KOWALCZYK J, KANSKI J, GORSKA-MATUSIAK Z, NALEPKA (1995). Rumen degradability of crude protein of dried grass and lucerne forage measured by *in sacco* incubation and predicted by near infrared spectroscopy, *Anim. Feed Sci. Technol.*, **72**, 203-216.

AUGE R.M (2001). Water relation, drought and VA mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, **11**, 3-42.

BAUMONT R, AUFRERE J, MESCHY F (2009). La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. *Revue trimestrielle Fourrages*, **198**, 153-173.

BAUMONT R, CHAMPCIAUX P, AGABRIEL J, ANDRIEU J, AUFRERE J, MICHALET-DOREAU B, DE MARQUILLY C (1999). Une démarche intégrée pour prévoir la valeur des aliments pour les ruminants : PrévAlim pour INRAtion. *Prod. Anim*, **12**, 183-194.

BENOIST D (2003). Compostage et valorisation agronomique. Document en ligne mis à jour en septembre 2005. [Consulté le 7/03/2013]. Disponible à partir de : http://paris.apca.chambagri.fr/co-compostage/data/compost_cuma.pdf. 1- 4.

BERGMAN EN (1990). Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiol. Rev.*, **70**, 567-590.

BOLTA SV, MIHELIC R, LOBNIK F, LESTAN D (2003). Microbial community structure during composting with and without mass inocula. *Compost Science and Utilisation*, **11**, 6-15.

CAMBARDELLA CA, RICHARD T L, RISSELL A (2003). Compost mineralization in soil as a function of composting process conditions. *European Journal of Soil Biology*. **39**, 117-127.

CARPENTER-BOGGS L, REGANOLD J.P, KENNEDY A.C, (2000). Effects of biodynamic preparations on compost development. *Biol. Agric. Hortic.* **17**, 313–328.

CASENAVE P (2005). Interêt de l'administration orale de potassium pour le traitement de l'hypokaliémie chez les bovins. Thèse Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.

COORDINATION I.N.R.A.P (Institut National de Recherches et d'Applications Pédagogiques) (1984). Alimentation des Bovins. *Edition I.T.E.B* (Institut Technique de l'Elevage Bovin), 129-136.

DEBROAS D, DEPARDON N, BLANCHARD G (1998). Hydrolyse enzymatique des protéines par les bactéries du rumen. *Année Biol, Elsevier.* **78**, 233-248.

DELAGARDE R, PEYRAUD JL, DELABY L, FAVERDIN P (2000). Vertical distribution of biomass, chemical composition and pepsin-cellulase digestibility in a perennial ryegrass sward: interaction with month of year, regrowth age and time of day. *Animal Feed Science and Technology.* **84**, 49-68.

DEMARQUILLY C (1977). Fertilisation et qualité du fourrage. *Rapport des Journées ADEPRINA sur la fertilisation* (19-20-21 octobre), organisées par l'I.N.A. (Paris-Grignon), p.69.

DEMARQUILLY C, ANDRIEU J (1988). Les fourrages. In : Alimentation des bovins ovins et caprins. *INRA Editions.* **3**, pp57-74.

DEMARQUILLY C, DULPHY JP, ANDRIEU J.P (1998). Valeurs nutritive et alimentaire des fourrages selon les techniques de conservation : foin, ensilage, enrubannage. *Revue trimestrielle Fourrages,* **155**, 349-369.

DEMEYER D, FIEVEZ V (2000). Ruminants et environnement : la méthanogenèse. *Ann. Zootech.,* **49**, 95-112.

DURU M, CALVIÈRE I (1993). Pédoclimat, fertilisation et croissance des prairies permanentes au printemps. III - Vitesse d'accumulation de la matière sèche et prévision de récolte à l'épiaison. *Revue trimestrielle Fourrages.* **136**, 513-528.

DURU M, CRUZ P, THEAU JP, (2008). Un modèle générique de digestibilité des prairies semées et permanentes pour raisonner les pratiques agricoles. *Revue trimestrielle Fourrages,* **193**, 79-102.

ENJALBERT F (1996). Les constituants des aliments et leur digestion chez les bovins : bases physiologiques. *Journées nationales des GTV,* 13-20.

FAN AM, STEINBERG VE (1996). Health implications of nitrate and nitrite in drinking water : an update on methemoglobinemia occurrence and reproductive and developmental toxicity. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* **23**, 35-43.

- FAO (Food and Agriculture Organisation) Rome (1981). Niveaux de production des récoltes et emploi des engrais. *Bulletin FAO Engrais et nutrition végétale*. **2**, 9-43.
- FERRAND A (2010). Digestion microbienne chez les ruminants. Cours de physiologie Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
- GAIND S, PANDEY A.K, LATA (2005). Biodegradation study of crop residues as affected by exogenous inorganic nitrogen and fungal inoculants. *Journal of Basic Microbiology*, **4**, 301-311.
- GUEGUEN L, LAMAND M, MESCHY F (1988). Nutrition minérale. In : Alimentation des bovins ovins et caprins. *INRA Editions*. **5**, pp 95-111.
- JARRIGE R, GRENET E, DEMARQUILLY C, BESTE JM (1995). Les constituants de l'appareil végétatif des plantes fourragères. Nutrition des ruminants domestiques, *INRA Editions*, pp 25-81.
- JARRIGE R (1988). Ingestion et digestion des aliments. In : Alimentation des bovins ovins et caprins. *INRA Editions*. **1**, 17-28.
- JOUANY JP, BROUDISCOU LP, PRINS RA, KOMISARCZUK-BONY S (1995). Métabolisme et nutrition de la population microbienne du rumen. Nutrition des ruminants domestiques. *INRA Editions*, pp 349-381.
- KLAMER M, BAAT E (1998). Microbial community dynamics during composting of straw material studied using phospholipid fatty acids analysis. *FEMS. Microbial. Ecol.* **27**, 9-20.
- KNODEN C, LAMBERT R, NIHOUL P et al. (2007). Fertilisation raisonnée des prairies. Ministère de la région Wallonne. *Les livrets de l'agriculture* n° **15**
- KOIKE S, PAN J, KOBAYASHI Y, TANAKA K (2003). Kinetics of *in sacco* fiber-attachment of representative ruminal cellulolytic bacteria monitored by competitive PCR. *J. Dairy Sci.*, **86**, 1429-1435.
- LARNEY F.J, BLACKSHAW R.E (2003). Weed Seed Viability in Composted Beef Cattle Feedlot Manure. *J. Environ. Qual.* **32**, 1105-1113
- LEI F, ANDERGHEYNST J.S, (2000). The effect of microbial inoculation and pH on microbial community structure changes during composting. *Process Biochem.* **35**, 923-929.
- LEMAIRE G, SALETTE J, LAISSUS R (1982). Analyse de la croissance d'une prairie naturelle normande au printemps: II. La dynamique d'absorption de l'azote et son efficacité. *Revue trimestrielle Fourrages*. **92**, 51-65.
- LUXEN P, GODDEN B, LIMBOURG P, MISERQUE O (2006). Le compostage des fumiers, une technique de valorisation des matières organiques en agriculture. *Les livrets de l'agriculture*, **3**. Collection de la Direction générale de l'Agriculture (Wallonie)
- MC DOWELL LR (2003). Minerals in Human and Animals Nutrition, *Elsevier*, pp 98-114.

MADELAINÉ M (1999). Toxicologie du potassium: risques pour les animaux domestiques et l'environnement. Etude bibliographique. Thèse Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes.

MAZOYER M, OUDOT B (2005). Etude des effets du Bactériolit et du Bactériosol sur le revenu des unités de production agricoles qui les utilisent. Evaluation des revenus obtenus par les utilisateurs et les non-utilisateurs. *Rapport de synthèse ADEPRINA (Association pour le Développement de l'Enseignement, du Perfectionnement et de la Recherche à l'Institut National Agronomique PARIS-GRIGNON)*.

MERIGOUT P (2006). Étude du métabolisme de la plante en réponse à l'apport de différents fertilisants et adjuvants culturaux. Influence des phytohormones sur le métabolisme azoté. Thèse Institut National Paris-Grignon

MESCHY F (2007). Alimentation minérale et vitaminique des ruminants : actualisation des connaissances. *INRA Prod. Anim*, **20**, 119-128.

MESCHY F, GUEGEN F (1995). Ingestion et absorption des éléments minéraux majeurs, Nutrition des ruminants domestiques. *INRA Editions*. p 383-406.

MEYNARD JM, JUSTES E, MACHET JM, RECOUS S (1997). Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes Reims (France). Ed. INRA, Paris, *Les Colloques*, n°83

MICHALET – DOREAU B, AUFRERE J (1990). Nouvelles méthodes d'estimation de la valeur alimentaire des fourrages. *Revue trimestrielle Fourrages*, **122**, 189-201.

MICHOL D, HOCH T, AGABRIEL J (2003). Besoins protéiques et maîtrise des rejets azotés du bovin producteur de viande. *Revue trimestrielle Fourrages*, **174**, 231-242.

MIRON J, BEN-GHEDALIA D, MORISSON M (2001). Adhesion mechanisms of rumen cellulolytic bacteria. *J. Dairy Sci.*, **84**, 1294-1309.

MINISTÈRE de l'ÉCOLOGIE et du DÉVELOPPEMENT DURABLE, Comité de la Prévention et de la Précaution (1998) Recommandation « nitrates » dans les eaux destinées à la consommation humaine. [Consulté le 05/03/2013]. Disponible à partir de : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/05-6.pdf>

NOZIERES MO, DULPHY JP, PEYRAUT JJ et al. (2007). La valeur azotée des fourrages. Nouvelles estimations de la dégradabilité des protéines dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle : conséquences sur les valeurs PDI. *INRA Prod. Anim.*, **20**, 109-118.

NRC National Research Council (2001). Nutrient requirements of dairy cattle. 7th revised Ed., *National Academy Press Washington DC*, p 381.

ØRSKOV E.R, MC DONALD I (1979). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *Journal of Agricultural Science Cambridge*. **92**, p 499-503.

PAUL E, CLARK F.E (2007). Soil Microbiology and Biochemistry. *Academic Press (Elsevier)*, p 137.

PEYRAUD JL (2000). Fertilisation azotée des prairies et nutrition des vaches laitières. Conséquences sur les rejets d'azote. *INRA Productions animales*, **13**, 61-72.

PEYRAUD J.L, ASTIGARRAGA L (1998). Review of the effect of nitrogen fertilization on the chemical composition, intake, digestion and nutritive value of fresh herbage, consequences on animal nutrition and N balance. *Animal feed science and technology*, **72**, 235-239.

PROTIN PV, TROCHARD R, CORRE-HELLOU G, NAUDIN C (2009). Impact des pratiques de fertilisation sur la productivité des prairies et mélanges céréales – protéagineux et la qualité du fourrage. *Revue trimestrielle Fourrages*, **198**, 115-130.

REEVE J.R, CARPENTER-BOGGS L, REGANOLD J.P, YORK A.L, BRINTON W.F, (2010), Influence of biodynamic preparations on compost development and resultant compost extracts on wheat seedling growth. *Bioresource Technology*, **101**, 5658-5666.

REID RL, STRACHAN NH (1974). The effects of a wide range of nitrogen rates on some chemical constituents of the herbage from perennial ryegrass swards with and without white clover. *J. Agric. Sci. Camb.* **83**, 393–401.

REMOND B, BRUGERE H, PONCET C, BAUMONT R, (1995). Le contenu du réticulo-rumen. In : Nutrition des ruminants domestiques, *INRA Editions*, pp 253-298.

RICHARD TL (2005). Reference module in earth systems and environmental sciences. *Encyclopedia of soils in the environment*. p 294-301.

RUSSELL JB, WALLACE RJ (1988). Energy yielding and consuming reactions. The rumen microbial ecosystem, *Elsevier Applied Science London and New York*, 185-215.

SAUVANT D, GRENET E, DOREAU D (1995). Dégradation chimique des aliments dans le réticulo-rumen : cinétique et importance. In : Nutrition des ruminants domestiques, *INRA Editions*, pp 383-406.

SAUVANT D, MARTIN O, BERTHELOT V, MERTENS D (2001). Influence de la digestion dans le rumen sur la composition des produits. *Renc. Rech. Rum.*, **8**, 71-74.

SAUVANT D, VAN MILGEN J (1995). Les conséquences de la digestion des aliments sur le métabolisme ruminal et les performances animales. *INRA Prod. Anim.*, **8**, 353-367.

SHARMAA S.D, KUMAR P, BHARDWAJ S.K, YADAV S.K (2011). Screening and selecting novel AM fungi and Azotobacter strain for inoculating apple under soil solarization and chemical disinfection with mulch practices for sustainable nursery management. *Scientia Horticulturae*, **130**, 164–174.

SCHVARTZ C, DECROUX J, MULLER JC. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée : Grandes cultures et prairies. *Edition France Agricole*, 373-387.

TAMMINGA S, VAN STRAALLEN W.M, SUBNEL A.P.J et al. (1994). The Dutch protein evaluation system : the DVE/OEB system. *Livestock Production Science*. **40**, 139-155.

TRISTANT D (2010). Impacts de l'utilisation de Bactériolit® ou du Bactériolit® Renforcé selon deux modalités d'apports sur fumier de génisses. Rapport d'essais réalisés à l'hiver 2009- 2010 sur la ferme expérimentale d'AgroParisTech à Grignon

VALARCHER JF, SCHELCHER F, FOUCRAS G, ESPINASSE J, (1995). Equilibre hydroionique: mécanismes régulateurs et pathologie. *Point Vét.*, **27** (numéro spécial), 697-704.

VARVIKKO T, LINDBERG J. E, (1985). Estimation of microbial nitrogen in nylon bag residues by feed N nutrition. *Brit. J. Nutr.*, **54**, 473- 481.

VERITE R, PEYRAUD JL (1988). Alimentation des bovins ovins et caprins. *INRA Editions*. **4**, 75-93.

VERMOREL MR (1988). Energy, the feed unit system. In : Alimentation des bovins ovins et caprins. *INRA Editions*. pp 23-30.

VIGNAU-LOUSTAU L, HUYGHE C (2008). Stratégies fourragères Pâturage-Ensilage-Foin. *Editions France Agricole*, 78-100.

WILMAN D (1975). Nitrogen and Italian ryegrass: 2. Growth up to 14 weeks: nitrogen, phosphorus and potassium content and yield. *J. Br. Grassld. Soc.* **31**, 243–247.

WILMAN D, KOOCHKEKI A, LWOGA AB (1976). The effects of interval between harvest and nitrogen application on the proportion and yield of crop fractions and on the digestibility and digestible yield and nitrogen content and yield of two perennial ryegrass varieties in the second harvest year. *J. Agric. Sci. Camb.* **87**, 59–74.

WILMAN D, GAO Y, ALTIMIMI M.A.K, 1996. Differences between related grasses, times of year and plant parts in digestibility and chemical composition. *J. Agric. Sci. Camb.* **127**, 311-318.

WOLTER R (1992). Alimentation de la vache laitière. *Editions la France Agricole*, pp 64-72.

ANNEXES

1- Plan des parcelles utilisées pour l'essai Gumiko bis



18 Objets :

1	Fumier composté 130 uN
2	Fumier composté 170 uN
3	Fumier composté 210 uN
4	Fumier composté 250 uN
5	Fumier composté 350 uN

6	Lisier 130 uN
7	Lisier 170 uN
8	Lisier 210 uN
9	Lisier 250 uN
10	Lisier 350 uN

11	Fum. paille VL 170 uN
12	Fum. mou VL 170 uN
13	Fum. comp.+Bacteriolit+ 170 uN
14	Compost biodyn. 130 uN
15	Témoin

16	Lisier de porcs 210 uN
17	Nmin 210 uN
18	Témoin zéro (N, P, K)

2- Tableau de résultats de l'étude in-sacco : pourcentages de CB et de MAT dégradées

Le tableau ci-dessous regroupe les % de CB et MAT dégradées, pour chaque coupe, modalité, vache et temps d'incubation (h).

Annee	Coupe	Modalité	Vache	Durée	DegCB	DegMAT
2009	1	Bacteriolit	Beca	6	29,51	58,08
2009	2	Bacteriolit	Beca	6	26,50	53,41
2009	3	Bacteriolit	Beca	6	19,08	52,84
2009	4	Bacteriolit	Beca	6	29,69	58,82
2010	1	Bacteriolit	Beca	6	27,54	62,03
2009	1	Temoin	Beca	6	22,94	56,64
2009	2	Temoin	Beca	6	24,53	47,26
2009	3	Temoin	Beca	6	20,77	46,52
2009	4	Temoin	Beca	6	25,50	45,58
2010	1	Temoin	Beca	6	26,06	37,38
2009	1	Bacteriolit	Beca	12	31,98	61,24
2009	2	Bacteriolit	Beca	12	39,74	66,26
2009	3	Bacteriolit	Beca	12	40,35	64,29
2009	4	Bacteriolit	Beca	12	46,98	74,67
2010	1	Bacteriolit	Beca	12	42,70	72,55
2009	1	Temoin	Beca	12	41,14	71,04
2009	2	Temoin	Beca	12	41,36	61,47
2009	3	Temoin	Beca	12	38,16	61,06
2009	4	Temoin	Beca	12	36,40	65,46
2010	1	Temoin	Beca	12	29,85	46,83
2009	1	Bacteriolit	Beca	24	53,93	75,66
2009	2	Bacteriolit	Beca	24	50,72	77,22
2009	3	Bacteriolit	Beca	24	54,28	76,09
2009	4	Bacteriolit	Beca	24	67,96	89,92
2010	1	Bacteriolit	Beca	24	39,87	71,43
2009	1	Temoin	Beca	24	60,15	81,98
2009	2	Temoin	Beca	24	50,33	70,70
2009	3	Temoin	Beca	24	53,45	75,97
2009	4	Temoin	Beca	24	58,87	79,70
2010	1	Temoin	Beca	24	51,90	68,12
2009	1	Bacteriolit	Beca	48	82,19	87,67
2009	2	Bacteriolit	Beca	48	70,95	84,13
2009	3	Bacteriolit	Beca	48	77,65	84,07
2009	4	Bacteriolit	Beca	48	79,69	88,26

2010	1	Bacteriolit	Beca	48	72,62	85,20
2009	1	Temoin	Beca	48	78,58	84,98
2009	2	Temoin	Beca	48	76,77	80,52
2009	3	Temoin	Beca	48	77,58	82,77
2009	4	Temoin	Beca	48	80,44	88,50
2010	1	Temoin	Beca	48	75,33	77,51
2009	1	Bacteriolit	Buzzer	6	17,76	48,61
2009	2	Bacteriolit	Buzzer	6	21,06	45,55
2009	3	Bacteriolit	Buzzer	6	22,31	53,23
2009	4	Bacteriolit	Buzzer	6	27,08	56,45
2010	1	Bacteriolit	Buzzer	6	19,47	53,94
2009	1	Temoin	Buzzer	6	19,62	55,98
2009	2	Temoin	Buzzer	6	19,26	39,82
2009	3	Temoin	Buzzer	6	20,67	44,54
2009	4	Temoin	Buzzer	6		44,87
2010	1	Temoin	Buzzer	6	28,57	35,05
2009	1	Bacteriolit	Buzzer	12	31,30	57,96
2009	2	Bacteriolit	Buzzer	12		
2009	3	Bacteriolit	Buzzer	12	34,99	61,40
2009	4	Bacteriolit	Buzzer	12	39,56	68,89
2010	1	Bacteriolit	Buzzer	12	34,67	63,18
2009	1	Temoin	Buzzer	12	33,31	63,40
2009	2	Temoin	Buzzer	12	34,41	56,75
2009	3	Temoin	Buzzer	12	41,00	59,37
2009	4	Temoin	Buzzer	12	26,61	51,21
2010	1	Temoin	Buzzer	12	31,07	44,11
2009	1	Bacteriolit	Buzzer	24	63,41	81,51
2009	2	Bacteriolit	Buzzer	24	59,07	82,15
2009	3	Bacteriolit	Buzzer	24	62,64	79,91
2009	4	Bacteriolit	Buzzer	24	70,48	89,53
2010	1	Bacteriolit	Buzzer	24	50,01	76,65
2009	1	Temoin	Buzzer	24	64,62	82,40
2009	2	Temoin	Buzzer	24	57,44	74,26
2009	3	Temoin	Buzzer	24	60,02	78,32
2009	4	Temoin	Buzzer	24	59,09	80,54
2010	1	Temoin	Buzzer	24	56,40	70,82
2009	1	Bacteriolit	Buzzer	48	81,42	84,77
2009	2	Bacteriolit	Buzzer	48	73,64	98,33
2009	3	Bacteriolit	Buzzer	48	79,24	86,84
2009	4	Bacteriolit	Buzzer	48		92,98
2010	1	Bacteriolit	Buzzer	48	76,42	84,18
2009	1	Temoin	Buzzer	48	79,95	85,94
2009	2	Temoin	Buzzer	48	77,14	81,29
2009	3	Temoin	Buzzer	48	76,34	84,20
2009	4	Temoin	Buzzer	48	81,33	89,98

2010	1	Temoin	Buzzer	48	77,15	77,50
2009	1	Bacteriolit	Venus	6	24,25	49,809
2009	2	Bacteriolit	Venus	6	19,09	43,385
2009	3	Bacteriolit	Venus	6	17,62	43,286
2009	4	Bacteriolit	Venus	6		
2010	1	Bacteriolit	Venus	6	14,10	55,307
2009	1	Temoin	Venus	6	18,08	51,325
2009	2	Temoin	Venus	6	20,24	45,154
2009	3	Temoin	Venus	6	17,91	35,507
2009	4	Temoin	Venus	6		
2010	1	Temoin	Venus	6	21,32	28,741
2009	1	Bacteriolit	Venus	12	30,37	54,169
2009	2	Bacteriolit	Venus	12	26,34	54,160
2009	3	Bacteriolit	Venus	12	29,45	52,022
2009	4	Bacteriolit	Venus	12		
2010	1	Bacteriolit	Venus	12	24,56	59,782
2009	1	Temoin	Venus	12	27,97	54,010
2009	2	Temoin	Venus	12	31,33	50,081
2009	3	Temoin	Venus	12	29,99	42,907
2009	4	Temoin	Venus	12		
2010	1	Temoin	Venus	12	23,73	30,746
2009	1	Bacteriolit	Venus	24		
2009	2	Bacteriolit	Venus	24		
2009	3	Bacteriolit	Venus	24		
2009	4	Bacteriolit	Venus	24		
2010	1	Bacteriolit	Venus	24	44,77	72,456
2009	1	Temoin	Venus	24	57,03	79,941
2009	2	Temoin	Venus	24	53,54	73,895
2009	3	Temoin	Venus	24		
2009	4	Temoin	Venus	24		
2010	1	Temoin	Venus	24	56,02	70,298
2009	1	Bacteriolit	Venus	48	81,29	79,695
2009	2	Bacteriolit	Venus	48	73,50	85,406
2009	3	Bacteriolit	Venus	48	78,92	87,740
2009	4	Bacteriolit	Venus	48		
2010	1	Bacteriolit	Venus	48	72,37	85,336
2009	1	Temoin	Venus	48	79,18	88,045
2009	2	Temoin	Venus	48	76,06	79,368
2009	3	Temoin	Venus	48	79,04	85,303
2009	4	Temoin	Venus	48		
2010	1	Temoin	Venus	48	74,71	80,273
2010	2	Bacteriolit	Beca	6		
2010	3	Bacteriolit	Beca	6	11,71	47,39
2011	1	Bacteriolit	Beca	6	30,59	64,70
2011	2	Bacteriolit	Beca	6	21,93	60,80

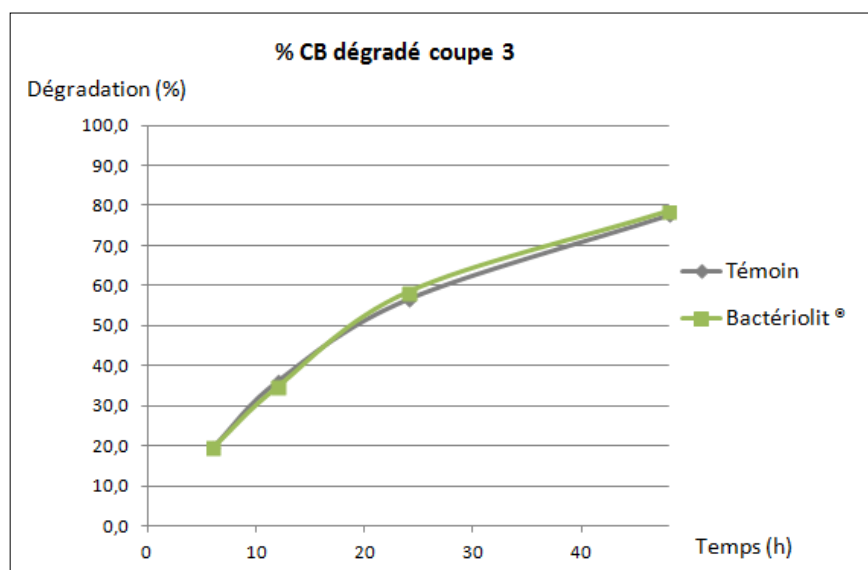
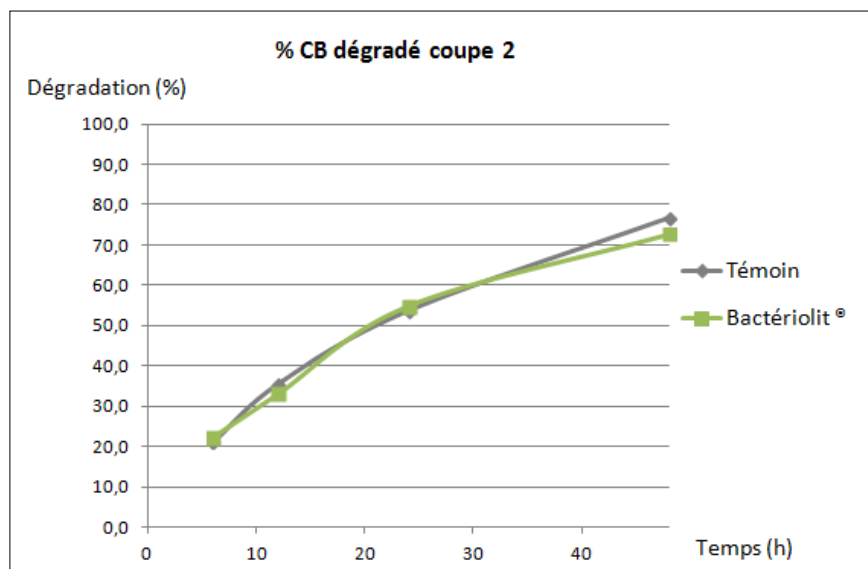
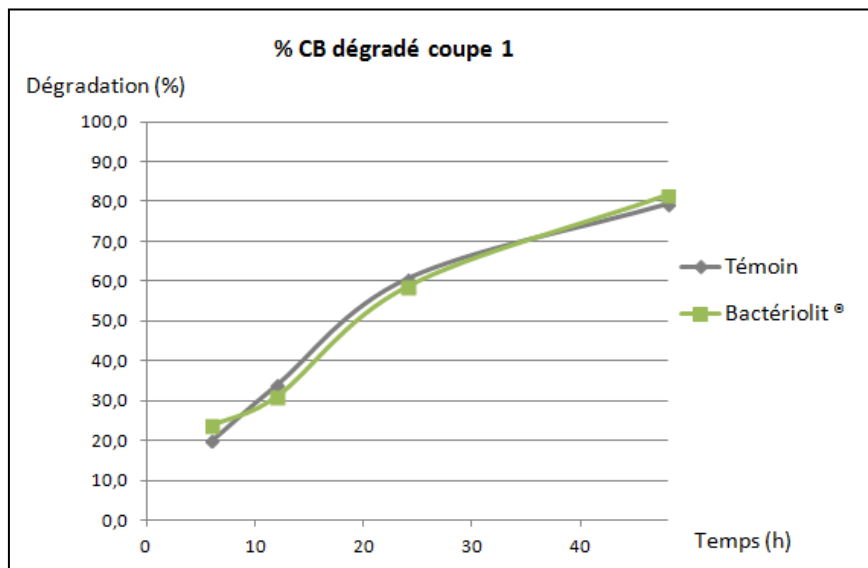
2011	3	Bacteriolit	Beca	6	21,74	54,14
2011	4	Bacteriolit	Beca	6	22,62	59,73
2010	2	Temoin	Beca	6	11,12	47,64
2010	3	Temoin	Beca	6	10,01	43,52
2011	1	Temoin	Beca	6	34,88	63,61
2011	2	Temoin	Beca	6	22,30	58,97
2011	3	Temoin	Beca	6		
2011	4	Temoin	Beca	6	8,45	57,65
2010	2	Bacteriolit	Beca	12	37,40	73,66
2010	3	Bacteriolit	Beca	12	32,65	65,38
2011	1	Bacteriolit	Beca	12	45,44	76,13
2011	2	Bacteriolit	Beca	12	37,12	68,30
2011	3	Bacteriolit	Beca	12	37,58	64,42
2011	4	Bacteriolit	Beca	12	43,80	75,16
2010	2	Temoin	Beca	12	35,26	68,38
2010	3	Temoin	Beca	12	36,99	67,34
2011	1	Temoin	Beca	12	53,77	79,39
2011	2	Temoin	Beca	12	40,17	74,83
2011	3	Temoin	Beca	12	47,41	75,38
2011	4	Temoin	Beca	12		
2010	2	Bacteriolit	Beca	24	48,22	77,27
2010	3	Bacteriolit	Beca	24	63,24	83,29
2011	1	Bacteriolit	Beca	24	57,76	84,38
2011	2	Bacteriolit	Beca	24	45,88	70,57
2011	3	Bacteriolit	Beca	24	44,23	71,04
2011	4	Bacteriolit	Beca	24	66,06	83,86
2010	2	Temoin	Beca	24	38,67	71,50
2010	3	Temoin	Beca	24	67,17	85,16
2011	1	Temoin	Beca	24	65,27	84,96
2011	2	Temoin	Beca	24		
2011	3	Temoin	Beca	24	70,32	84,82
2011	4	Temoin	Beca	24	70,51	86,54
2010	2	Bacteriolit	Beca	48	83,69	83,63
2010	3	Bacteriolit	Beca	48	77,46	85,98
2011	1	Bacteriolit	Beca	48		88,66
2011	2	Bacteriolit	Beca	48	76,15	80,64
2011	3	Bacteriolit	Beca	48		88,00
2011	4	Bacteriolit	Beca	48	80,86	88,55
2010	2	Temoin	Beca	48	62,06	82,93
2010	3	Temoin	Beca	48	79,01	88,54
2011	1	Temoin	Beca	48	78,03	88,31
2011	2	Temoin	Beca	48	74,21	80,77
2011	3	Temoin	Beca	48	75,81	90,41
2011	4	Temoin	Beca	48	83,02	91,84
2010	2	Bacteriolit	Buzzer	6	19,50	53,90

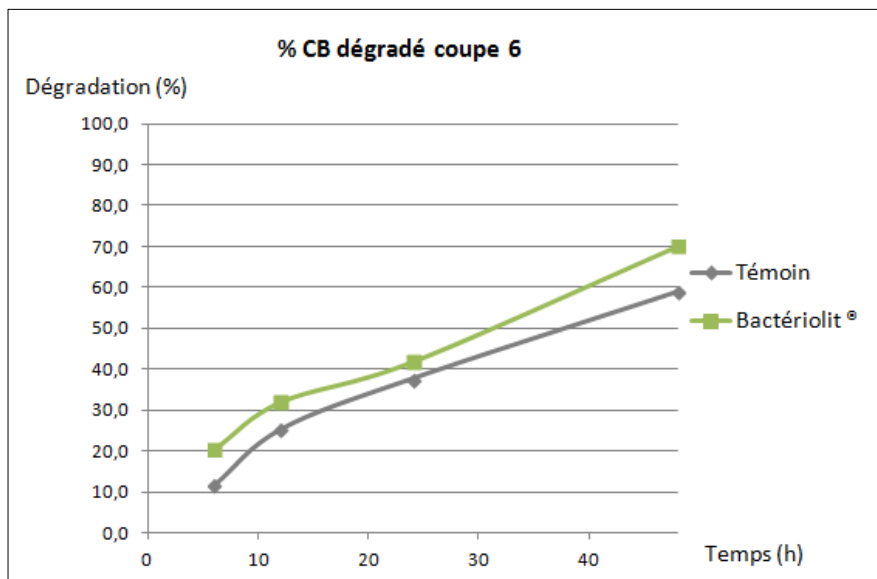
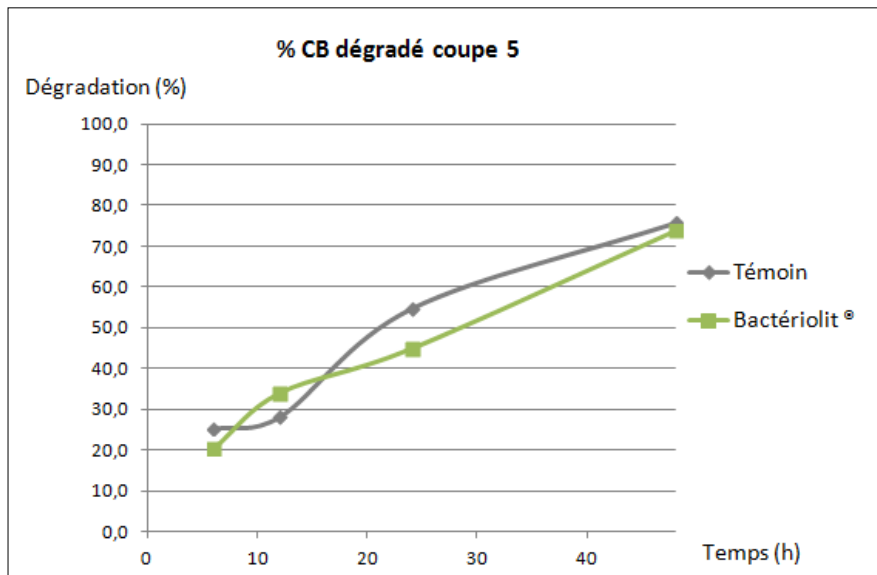
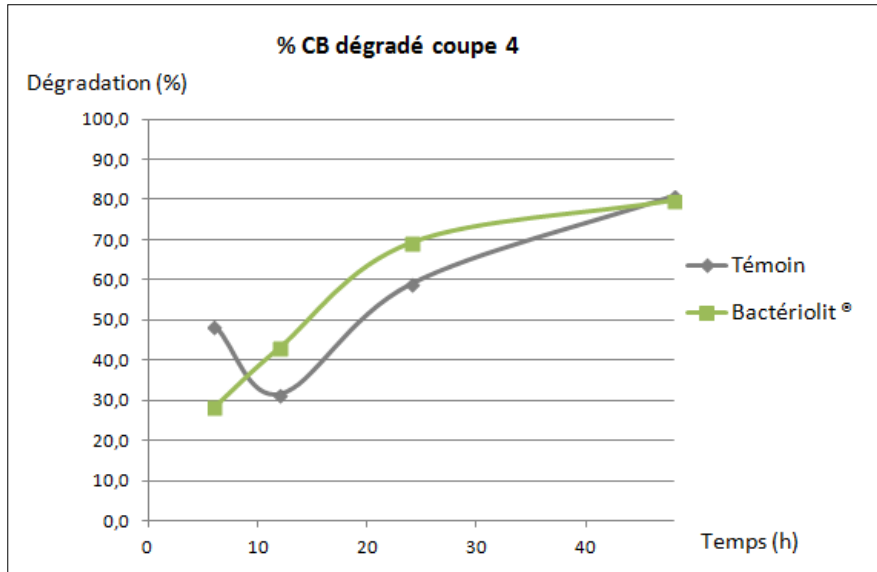
2010	3	Bacteriolit	Buzzer	6	7,49	45,41
2011	1	Bacteriolit	Buzzer	6	23,57	63,78
2011	2	Bacteriolit	Buzzer	6	22,16	53,85
2011	3	Bacteriolit	Buzzer	6	26,79	59,72
2011	4	Bacteriolit	Buzzer	6	20,66	59,15
2010	2	Temoin	Buzzer	6	8,75	44,82
2010	3	Temoin	Buzzer	6	8,75	42,12
2011	1	Temoin	Buzzer	6	31,41	57,69
2011	2	Temoin	Buzzer	6	17,73	57,45
2011	3	Temoin	Buzzer	6	22,98	57,67
2011	4	Temoin	Buzzer	6		
2010	2	Bacteriolit	Buzzer	12	24,60	63,39
2010	3	Bacteriolit	Buzzer	12	25,69	59,65
2011	1	Bacteriolit	Buzzer	12	32,96	67,31
2011	2	Bacteriolit	Buzzer	12	31,14	61,94
2011	3	Bacteriolit	Buzzer	12	29,37	61,00
2011	4	Bacteriolit	Buzzer	12	35,12	70,43
2010	2	Temoin	Buzzer	12	17,65	55,16
2010	3	Temoin	Buzzer	12	22,82	55,32
2011	1	Temoin	Buzzer	12	40,26	67,57
2011	2	Temoin	Buzzer	12	29,65	64,72
2011	3	Temoin	Buzzer	12	34,02	68,00
2011	4	Temoin	Buzzer	12	35,90	71,95
2010	2	Bacteriolit	Buzzer	24	40,24	74,73
2010	3	Bacteriolit	Buzzer	24	42,66	75,48
2011	1	Bacteriolit	Buzzer	24	54,20	80,84
2011	2	Bacteriolit	Buzzer	24	44,59	73,81
2011	3	Bacteriolit	Buzzer	24	36,07	65,89
2011	4	Bacteriolit	Buzzer	24	49,16	78,48
2010	2	Temoin	Buzzer	24	28,08	64,96
2010	3	Temoin	Buzzer	24	44,93	76,65
2011	1	Temoin	Buzzer	24	46,35	75,19
2011	2	Temoin	Buzzer	24		85,60
2011	3	Temoin	Buzzer	24	29,62	66,91
2011	4	Temoin	Buzzer	24		90,66
2010	2	Bacteriolit	Buzzer	48	55,89	79,61
2010	3	Bacteriolit	Buzzer	48	70,25	82,51
2011	1	Bacteriolit	Buzzer	48		81,64
2011	2	Bacteriolit	Buzzer	48		73,76
2011	3	Bacteriolit	Buzzer	48		
2011	4	Bacteriolit	Buzzer	48	76,29	81,80
2010	2	Temoin	Buzzer	48	53,83	78,97
2010	3	Temoin	Buzzer	48	75,21	87,42
2011	1	Temoin	Buzzer	48		83,33
2011	2	Temoin	Buzzer	48	65,75	76,16

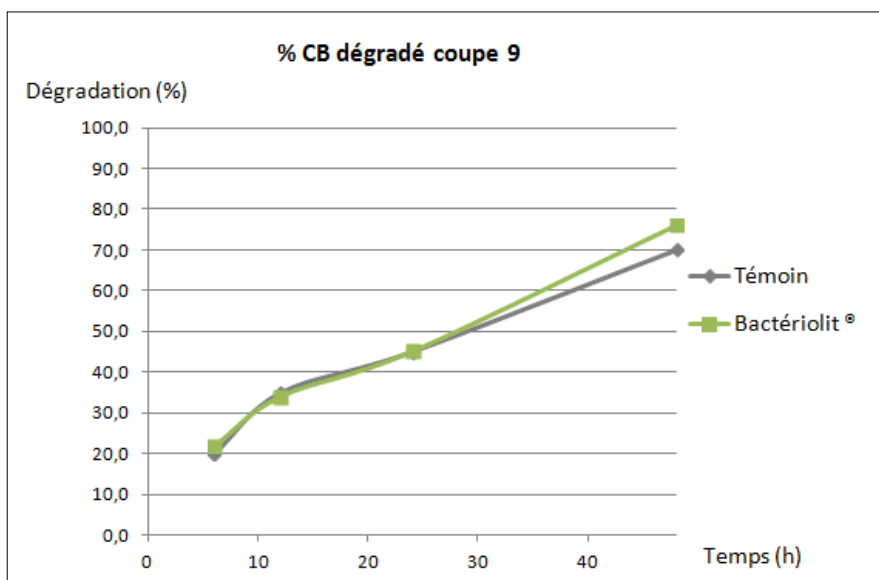
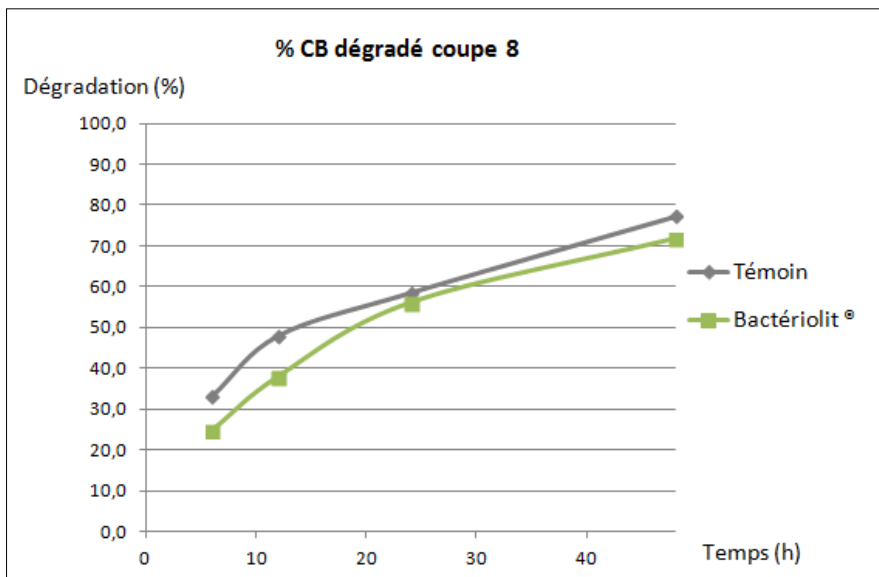
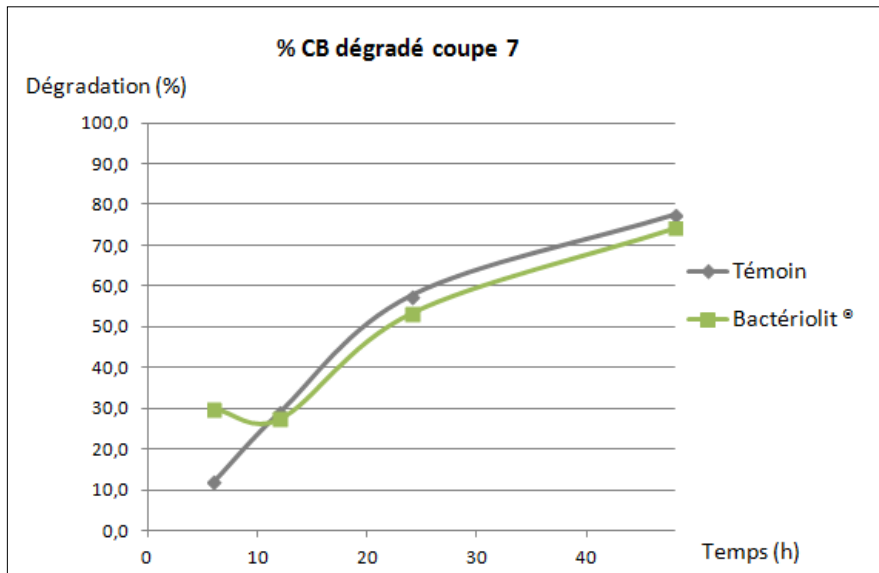
2011	3	Temoin	Buzzer	48	71,31	84,75
2011	4	Temoin	Buzzer	48		85,77
2010	2	Bacteriolit	Buzzer	6	21,53	53,79
2010	3	Bacteriolit	Venus	6		
2011	1	Bacteriolit	Venus	6	20,42	61,29
2011	2	Bacteriolit	Venus	6		
2011	3	Bacteriolit	Venus	6		
2011	4	Bacteriolit	Venus	6		
2010	2	Temoin	Venus	6	14,87	48,05
2010	3	Temoin	Venus	6	17,37	47,23
2011	1	Temoin	Venus	6		
2011	2	Temoin	Venus	6		
2011	3	Temoin	Venus	6		
2011	4	Temoin	Venus	6		
2010	2	Bacteriolit	Venus	12	34,18	65,36
2010	3	Bacteriolit	Venus	12	23,66	59,84
2011	1	Bacteriolit	Venus	12	35,77	69,77
2011	2	Bacteriolit	Venus	12		
2011	3	Bacteriolit	Venus	12		
2011	4	Bacteriolit	Venus	12		
2010	2	Temoin	Venus	12	22,66	55,40
2010	3	Temoin	Venus	12	27,18	56,57
2011	1	Temoin	Venus	12	49,91	75,17
2011	2	Temoin	Venus	12		
2011	3	Temoin	Venus	12		
2011	4	Temoin	Venus	12		
2010	2	Bacteriolit	Venus	24	37,26	70,70
2010	3	Bacteriolit	Venus	24	54,05	79,43
2011	1	Bacteriolit	Venus	24	56,37	83,05
2011	2	Bacteriolit	Venus	24		
2011	3	Bacteriolit	Venus	24		
2011	4	Bacteriolit	Venus	24		
2010	2	Temoin	Venus	24	46,20	77,89
2010	3	Temoin	Venus	24	60,80	82,15
2011	1	Temoin	Venus	24	63,94	85,01
2011	2	Temoin	Venus	24		
2011	3	Temoin	Venus	24		
2011	4	Temoin	Venus	24		
2010	2	Bacteriolit	Venus	48	70,78	93,34
2010	3	Bacteriolit	Venus	48	74,81	85,70
2011	1	Bacteriolit	Venus	48	71,78	86,78
2011	2	Bacteriolit	Venus	48		
2011	3	Bacteriolit	Venus	48		
2011	4	Bacteriolit	Venus	48		
2010	2	Temoin	Venus	48	60,58	81,06

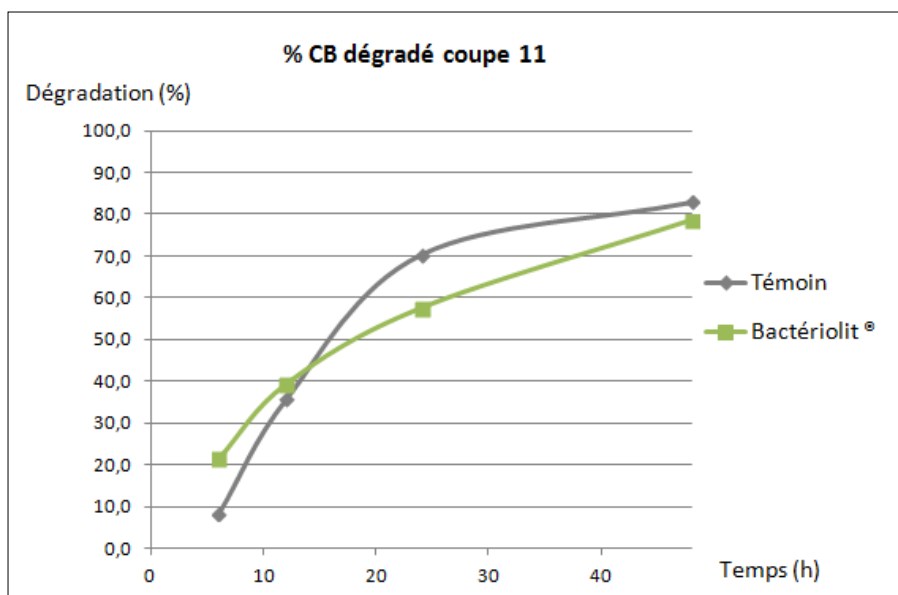
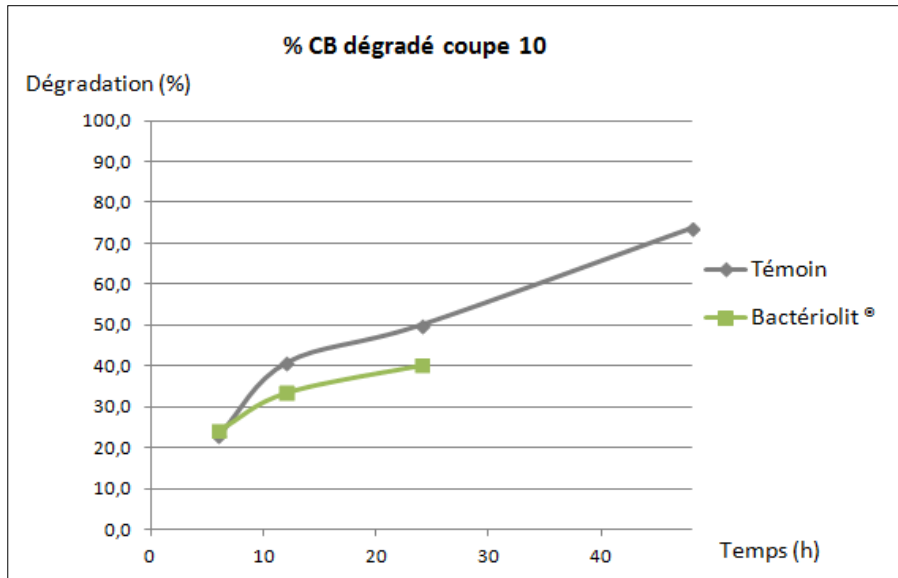
2010	3	Temoin	Venus	48	77,90	87,92
2011	1	Temoin	Venus	48	76,55	87,30
2011	2	Temoin	Venus	48		
2011	3	Temoin	Venus	48		
2011	4	Temoin	Venus	48		

3- Courbes représentant la dégradation de la CB (%) en fonction du temps (h)

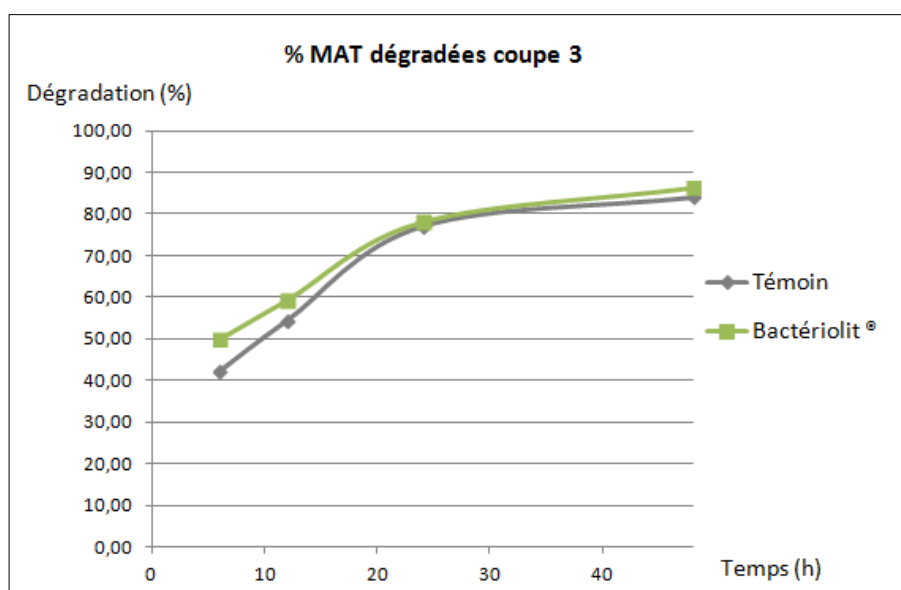
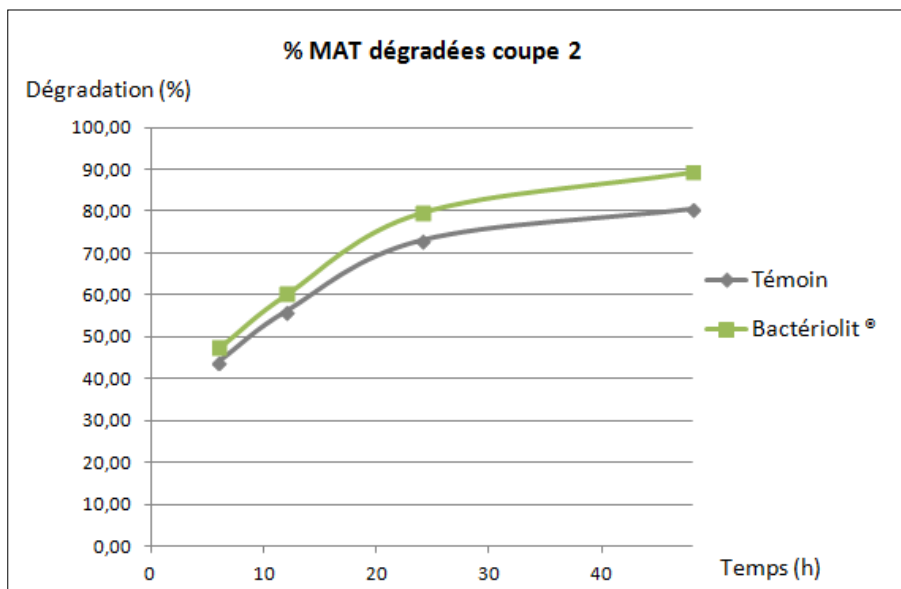
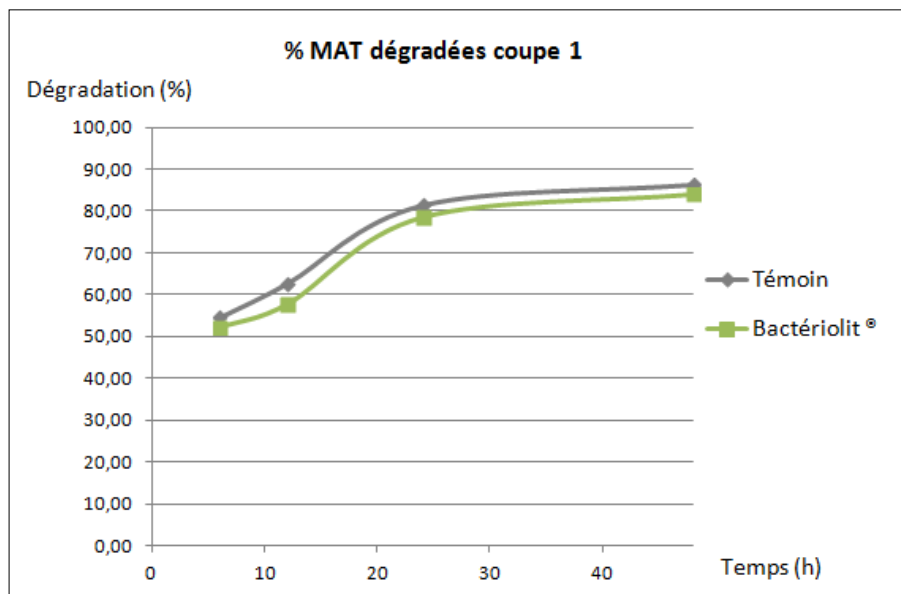


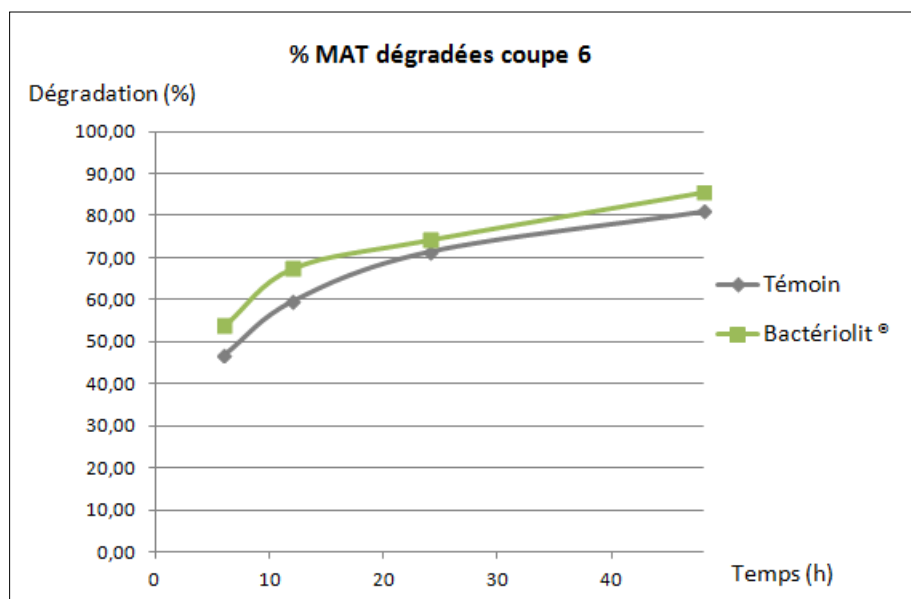
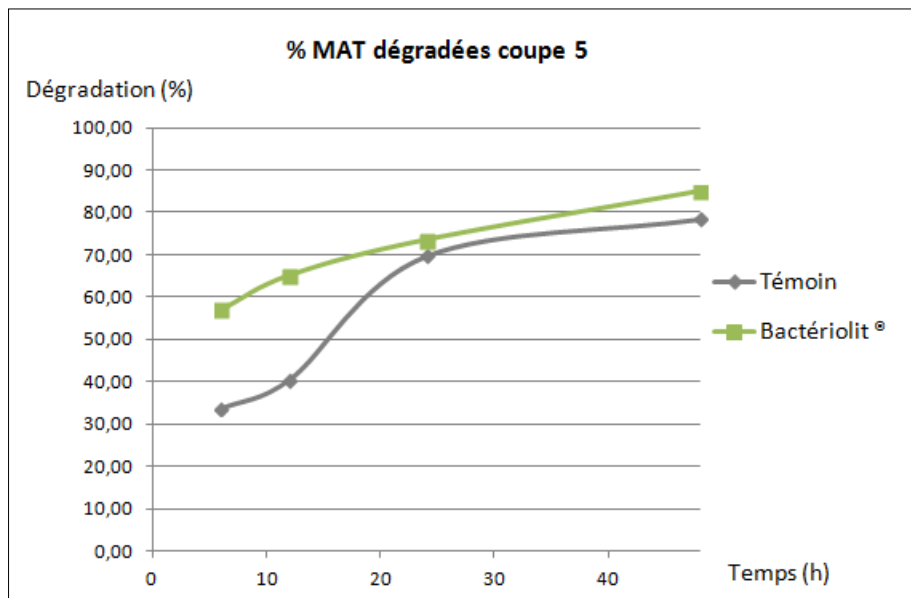
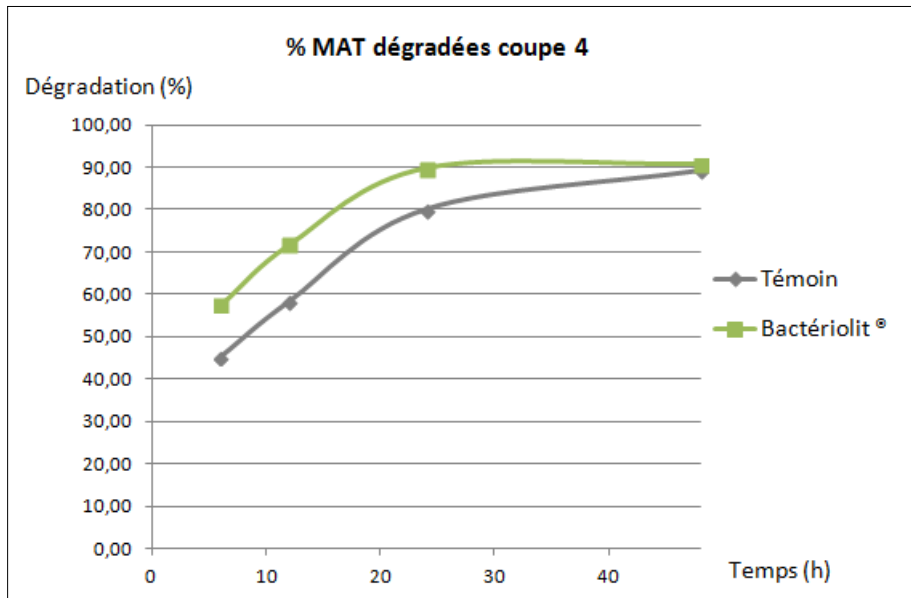


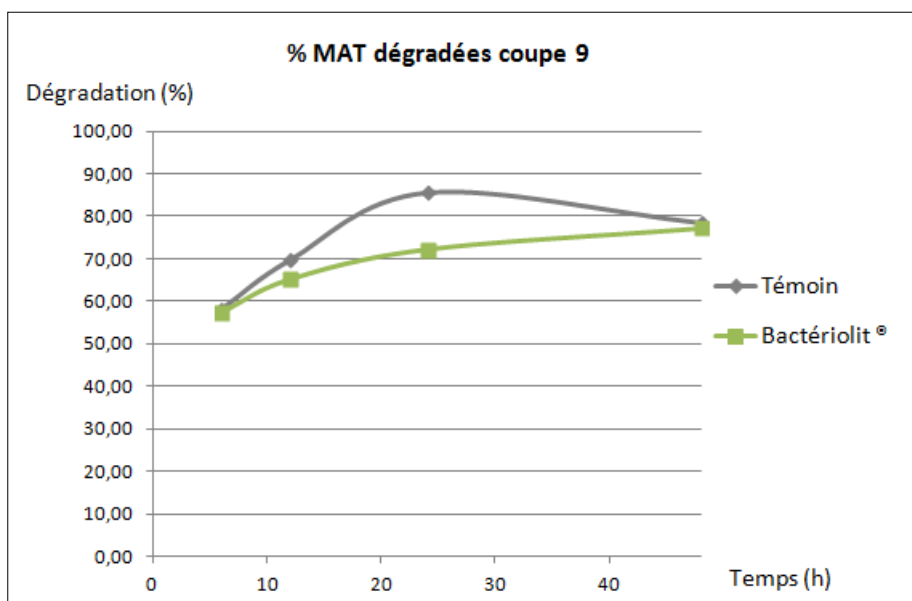
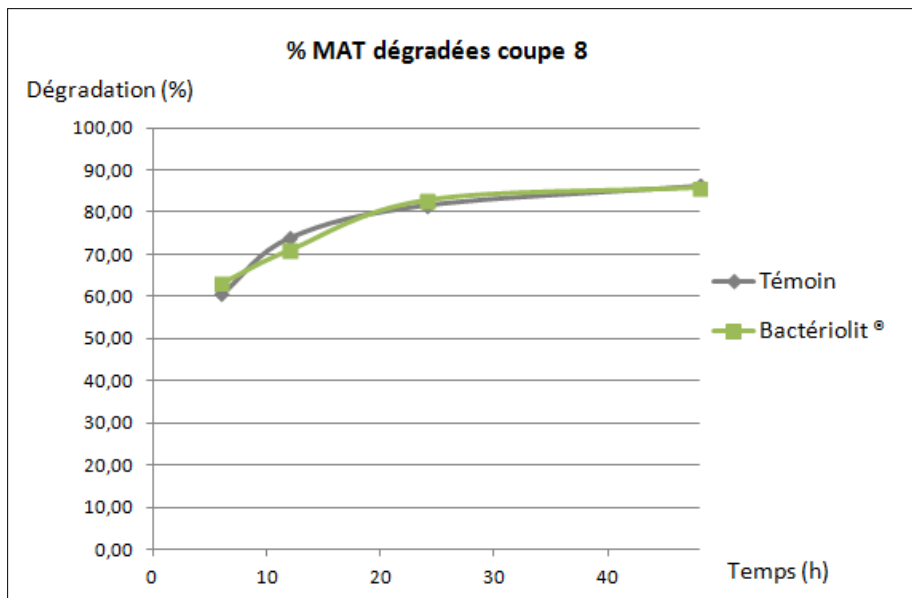
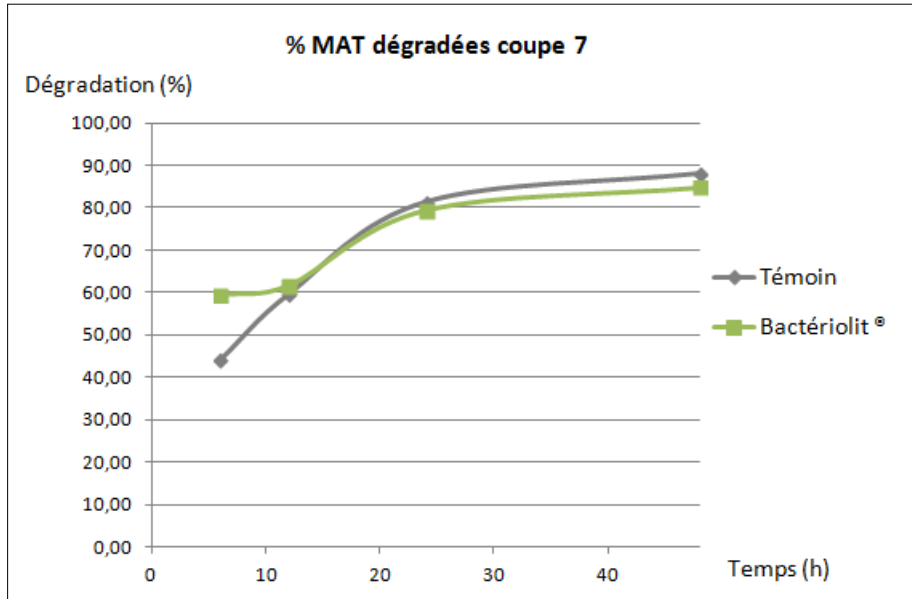


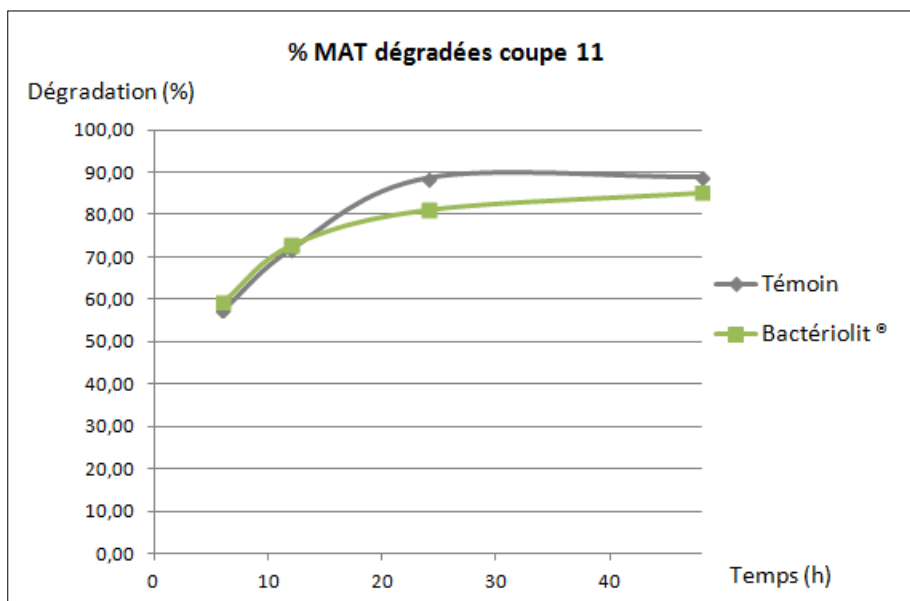
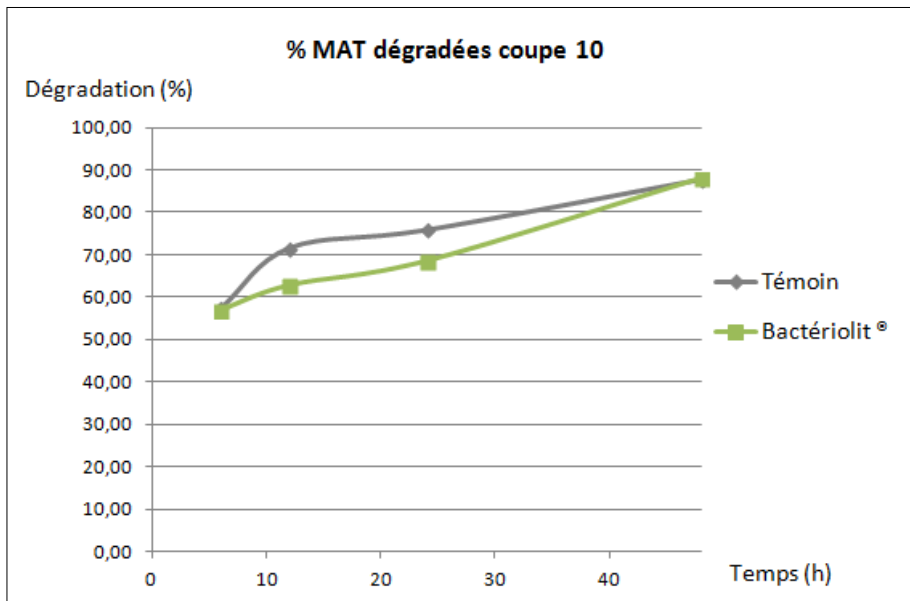


4 – Courbes représentant la dégradation des MAT (%) en fonction du temps (h)









Toulouse, 2014

NOM : Boyé

PRENOM : Marlène

TITRE : ETUDE IN SACCO DE LA DEGRADATION RUMINALE DES FIBRES ET DES MATIERES AZOTEES DE FOURRAGES FERTILISES AVEC DU FUMIER TRAITE OU NON PAR DU BACTERIOLIT®

RESUME : Les fumiers traités par ensemencement avec des microorganismes sont une alternative aux fertilisations classiques faisant appel à des engrais minéraux de type nitrates ainsi qu'à l'utilisation de fumiers bruts. Cette étude expérimentale avait pour objectif d'expliquer l'amélioration de performances zootechniques, rapportée par un certain nombre d'observations de terrain, chez des animaux consommant l'herbe issue de prairies fertilisées par un fumier composté avec un produit du commerce. Ce travail s'est fondé sur des prélèvements issus d'une autre expérimentation à visée agronomique : des échantillons recueillis sur 3 années (et 11 coupes) de fourrages fertilisés avec fumier seul d'une part (témoin), et fumier traité avec du Bactériolit® d'autre part. Il conclut à de petites différences de composition chimique des fourrages et une légère augmentation de la vitesse de dégradation initiale des matières azotées pour les prairies traitées, mais sans modification de la dégradation ruminale de la cellulose brute.

MOTS CLES : DEGRADATION RUMINALE, FOURRAGES, FERTILISATION

ENGLISH TITLE: IN SACCO STUDY OF FIBRE AND NITROGEN RUMINAL DEGRADATION FOR HAYS FERTILIZED WITH MANURE TREATED OR NOT TREATED WITH BACTERIOLIT®

ABSTRACT: Manures sown with micro-organisms are an alternative to traditional fertilizations such as mineral fertilizers (nitrates) or rough manures. This experimental study aimed to explain the improvement of zootechnical performances reported by field observations in animals consuming grass coming from meadows fertilized with manure sown with a commercial product. This work was based on samples resulting from another agronomic experimentation: they were collected during 3 years (and 11 cuts) and came from meadows fertilized with manure alone on the first hand, and manure treated with Bactériolit® on the other hand. This study showed small hay chemical composition differences, and a slight increase of the initial nitrogen degradation rate for treated meadows, but without modification of fiber ruminal degradation.

KEY WORDS : RUMINAL DEGRADATION, FODDER, FERTILIZATION