ISTOM

Ecole d'Ingénieur en Agro-Développement International

32, Boulevard du Port F.-95094 - Cergy-Pontoise Cedex
Tél : 01.30.75.62.60 télécopie : 01.30.75.62.61 istom@istom.net

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Evaluation en exploitation par spectrométrie dans le proche infrarouge de la qualité et de la composition des ensilages d'herbe et de leurs facteurs de variation à la Réunion

GRIES Julien

98ème Promotion

Stage effectué à St pierre, île de la Réunion

Du 04/09/2012 au 28/02/2013

Au sein de : Pôle élevage, CIRAD

Maître de stage: Mr. Tillard Emmanuel

Tuteur : Mr. Costera Adrian

RESUME ET MOTS-CLES

Résumé

Le recours à la spectrométrie dans le proche infrarouge est une méthode utilisée dans de nombreux domaines pour sa capacité à donner des résultats de toutes sortes quasi en temps réel. Le CIRAD a décidé de développer cet outil dans un but ultérieur de vulgarisation auprès des techniciens suivant les éleveurs travaillant avec des balles rondes d'ensilage d'herbe pour nourrir leur bétail. La SPIR permettra donc un gain de temps indéniable pour le conseil en nutrition animale. En parallèle, un diagnostic des facteurs de variations de la qualité des ensilages à été demandé par l'organisme afin de guider les éleveurs dans leurs pratiques agricoles visant à produire de l'ensilage d'herbe. Par le biais d'enquêtes et de prélèvements d'échantillons récoltés lors de la calibration des 2 spectromètres, un modèle des pratiques optimales pour la réalisation d'ensilage d'herbe à la Réunion a été réalisé.

Mots clés : SPIR, calibration, valeur alimentaire, valeur de conservation, ensilage, fourrage, île de la Réunion

Summarry

The use of near infrared spectrometry is a method used in many fields for its ability to provide results of all kinds almost in real time. CIRAD has decided to develop this tool in order to propose it to all technicians following breeders working with bales of grass silage to feed their livestock. NIRS will thus gain time for the animal nutrition advices. In parallel, a diagnostic of the factors of changes in silage quality has been requested by the agency to guide farmers in their farming practices to produce grass silage. Through surveys and sampling collected during the calibration of two spectrometers, a model of best practices for the implementation of grass silage in Reunion island was conducted.

Keywords: NIRS, calibration, nutritional value, conservation value, silage, grass, Reunion Island

Resumen

La espectrometría de infrarrojo es un método utilizado en muchos campos por su capacidad para proporcionar resultados de todo tipo casi en tiempo real. CIRAD ha decidido desarrollar esta herramienta para todos los técnicos trabajando con los criadores que trabajan con balas de ensilado de hierba para alimentar a su ganado. NIRS así ganará tiempo para consejos en nutrición animal. Al mismo tiempo, un diagnóstico de los factores de cambia de la calidad del ensilaje ha sido solicitada por la agencia para orientar a los agricultores en sus prácticas agrícolas para producir ensilado de hierba. A través de encuestas y muestreos recogidos durante la calibración de dos espectrómetros, un modelo de mejores prácticas para la implementación de ensilado de hierba en la reunión se llevó a cabo.

Palabras claves : NIRS , Calibración, valor nutritivo, valor de conservación, ensilaje, forraje, la Reunión

RESUME ET MOTS-CLES 2

INDEX DES FIGURES 5

INDEX DES TABLEAUX 6

TABLE DES SIGLES ET ABREVIATIONS 7

REMERCIEMENTS 8

INTRODUCTION 9

1. LES FACTEURS DE VARIATION DE QUALITE DES ENSILAGES : GENERALITES. 10

1.1. PRODUCTION DE L'ENSILAGE 10
1.2. NOTION DE QUALITE 11
1.2.1. VALEUR ALIMENTAIRE 11
1.2.2. QUALITE DE CONSERVATION 12
1.3. FACTEURS INFLUENÇANT LA QUALITE DE L'ENSILAGE 13
1.3.1. APTITUDES DES FOURRAGES A L'ENSILAGE 13
1.3.2. FACTEURS LIES AU MILIEU ET A LA TECHNIQUE 14
1.3.3. CARACTERISTIQUES ORGANOLEPTIQUES 14
1.4. ECHELLE D'EVALUATION DE LA QUALITE DE L'ENSILAGE 15

2. LA SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE (SPIR) COMME OUTIL POUR L'ANALYSE DES ALIMENTS 16

2.1. PRINCIPE 16
2.2. INTERET ET LIMITES 16
2.3. APPLICATION EN NUTRITION DES ANIMAUX 16

3. CONTEXTE DE L'ETUDE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL 18

3.1. CONTEXTE DE L'ETUDE 18
3.1.1. CONTEXTE PHYSIQUE 18
3.1.2. L'ELEVAGE BOVIN A LA REUNION 19
3.1.3. PRODUCTION FOURRAGERE 19
3.1.4. ENSILAGE EN BALLES RONDES 21
3.1.5. ESPECES UTILISEES POUR L'ENSILAGE 21
3.2. ENQUETE ET POPULATION CIBLEE 23
3.2.1. CHOIX DES ELEVEURS 23
3.2.2. DONNEES RECHERCHEES 24
3.3. SPECTROMETRES UTILISES 24
3.3.1. FOSS 24
3.3.2. ASD 25
3.3.3. PHAZIR 25
3.4. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL 25
3.4.1. ECHANTILLONNAGE 25
3.4.2. MESURE DES SPECTRES 26
3.4.3. ANALYSES DE LABORATOIRE 28

4. MESURE DE LA QUALITE DES ENSILAGES A L'AIDE DE LA SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE 30

4.1. REMARQUE PREALABLE 30
4.2. PRINCIPE GENERAL 30
4.3. TRAITEMENT DES SPECTRES 30
4.3.1. ALLURE DES SPECTRES PRELEVES 30
4.3.2. TRAITEMENTS INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES DES SPECTRES 30
4.4. METHODE ANALYTIQUE 31
4.4.1. CONSTRUCTION DE LA POPULATION ET SELECTION DU GROUPE DE CALIBRATION : L'ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE 31
4.4.2. ETABLISSEMENT D'ETALONNAGES PREDICTIFS 32
4.4.3. LES CRITERES DE JUGEMENT D'UNE CALIBRATION 33
4.5. RESULTATS 35
4.5.1. CALIBRATIONS EFFECTUEES 35
4.5.2. ETAPES SUCCESSIVES POUR LA CALIBRATION DU FOSS 35
4.5.3. CALIBRATION AVEC LES VALEURS PREDITES PAR LE FOSS 40
4.6. SELECTION DES 50 ECHANTILLONS POUR LA CALIBRATION FUTURE AVEC LES VALEURS DE LABORATOIRE 48
4.6.1. ETAPES SUCCESSIVES 49
4.7. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE SAISON SECHE 50
4.7.1 RESULTATS DE SAISON SECHE 50
4.8. DISCUSSION 52

5. LES FACTEURS ASSOCIES A LA QUALITE DE L'ENSILAGE A LA REUNION 53

5.1. VARIABLES RETENUES 54
5.2. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP) 55
5.2.1. OBJECTIFS 55
5.2.2. RESULTATS 55
5.3. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES SUR VARIABLES INSTRUMENTALES (ACPVI) 62
5.4. ANALYSES INFERENTIELLES (MODELES LINEAIRES) 63
5.4.1. VARIABLES A MODELISER 63
5.4.2. RESULTATS 64
5.4.3. REMARQUE 72
5.5. DISCUSSION 73
5.6. PRATIQUES OPTIMALES POUR LA REALISATION D'UN ENSILAGE 76

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 77

BIBLIOGRAPHIE 78

TABLE DES ANNEXES 81

Index des figures

Figure 1 Appréciation des ensilages selon la valeur du pH en relation avec la teneur en matière sèche (MS) (source: Wiss, 2007) ... 15
Figure 2 Diversité des grainées dans les systèmes prairiaux réunionnais (P. Grimaud et Thomas 2002) ... 20
Figure 3 Stades de développement des graminées (Source: Wiss, 2007) ... 24
Figure 4 ASD FieldSpec® 3 ... 25
Figure 5 PhazIR™ (Polychromix, USA) ... 25
Figure 6 Sens du prélèvement au sein de la balle ... 26
Figure 7 Répartition des points de mesure sur l'échantillon ... 27
Figure 8 Echantillon prélevé et mis en place pour la mesure des spectres (Photo : V. Barbet-Massin) ... 27
Figure 9 Exemples de spectres aberrants ... 36
Figure 10 Exemples de spectres outliers ... 36
Figure 11 Moyenne de l'ensemble des spectres trimés ... 37
Figure 12 Spectre de l'eau dans le proche infrarouge ... 38
Figure 13 Réalisation d'une ACP avec l'ensemble des spectres ... 38
Figure 14 traitements mathématiques retenus par tâtonnement ... 39
Figure 15 Spectres après les traitements mathématiques ... 40
Figure 16 Confrontation de tous les échantillons à leur valeur alimentaire ... 41
Figure 17 Equation de calibration retenue pour les protéines ... 43
Figure 18 Equation de calibration retenue pour les cendres ... 44
Figure 19 Equation de calibration retenue pour la cellulose ... 45
Figure 20 Equation de calibration retenue pour le Nuetral Detergent Fiber (NDF) ... 45
Figure 21 Equation de calibration retenue pour l'Acid Detergent Lignin (ADL) ... 46
Figure 22 Equation de calibration retenue pour l'Acid Detergent Fiber (ADF) ... 46
Figure 23 Equation de calibration retenue pour la digestibilité de la matière sèche. ... 47
Figure 24 Equation de calibration retenue pour le taux de matière sèche. ... 48
Figure 25 Compilation spectrale des spectres obtenus sur une année (saison humide en vert) ... 49
Figure 26 ACP réalisée sur la totalité des spectres ... 49
Figure 27 Sélection des 50 échantillons ayant le plus de variabilité ... 50
Figure 28 Représentation des valeurs propres et du pourcentage de variance cumulé par les différents axes ... 56
Figure 29 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe) ... 57
Figure 30 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe) ... 58
Figure 31 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe) ... 59
Figure 32 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe) ... 60
Figure 33 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe) ... 61
Figure 34 Représentation du plan factoriel 1-2 de l'ACPVI: représentation des variables X et Y (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon les différents indicateurs du tableau X, précisés en bas à gauche de chaque graphe) ; les deux derniers graphes représentent les individu, regroupés selon la zone et la filière, deux variables n'ayant pas participé à l'analyse (non inclues dans X). ... 62
Figure 35 ***Examen des corrélations entre les variables à expliquer, deux à deux. Les corrélations significativement différentes de 0 sont en rouge.*** **... 64**
Figure 36 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)*** **... 66**
Figure 37 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)*** **... 68**
Figure 38 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)*** **... 70**
Figure 39 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)*** **... 72**

Index des tableaux

Tableau 1 Qualité de conservation des ensilages en balles enrubannées en fonction de la MS (Paillat 1995) 15
Tableau 2 Chiffres filière bovine 2007 (Agreste) 19
Tableau 3 Cultures fourragères 2009 à la Réunion (Agreste) 20
Tableau 4 Valeurs de RPD et qualité d'une calibration (Williams, 1987) 35
Tableau 5 Statistiques descriptives de la calibration établie pour l'ASD avec les prédictions FOSS comme analyses de référence 42
Tableau 6 Statistiques descriptives de la calibration établie pour l'ASD avec les analyses de laboratoire comme valeurs de référence 50
Tableau 7 Statistiques descriptives de la calibration établie pour l'ASD avec les prédictions FOSS comme analyses de référence 51
Tableau 8 Statistiques descriptives de calibration du FOSS 51
Tableau 9 Principales caractéristiques des exploitations enquêtées 53
Tableau 10 Représentation des 11 variables à analyser ainsi que leurs composantes statistiques principales. 54
Tableau 11 Comparaison des valeurs retenues avec un éleveur dont les pratiques correspondent avec nos pratiques considérées comme optimale avec la moyenne des valeurs prédites par le FOSS des échantillons prélevés. 76

Table des sigles et abréviations

SPIR : spectrométrie en proche infrarouge
CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériels Agricoles
ha : hectare (1 ha = 10.000 m_2)
% :Pourcent
Km : Kilomètre
M : mètre
Cm : Centimètre
Kg :Kilogramme
Ha : Hectare
M^2 : Mètre carré
T :Tonnes
°C : Degré Celsius
ASD : Analytical Spectral Devices
MAT : matières azotées totales
AGV : acides gras volatils
NDF : Nuetral Detergent fiber
ADF : Acid Detergent Fiber
ADL : Acid Detergent Ligin
PDI : protéines digestibles dans l'intestin
dMO : digestibilité de la matière organique
MS : matière sèche
dMS : digestibilité de la matière sèche
ACP : analyse en composantes principales
ACPvi : analyse en composantes principales sur valeurs instrumentales
Ash : cendres
UFL : unité fourragère laitière
Ing : ingestibilité

Remerciements

Je tenais à remercier en premier lieu mon maître de stage, Mr Tillard Emmanuel pour ses conseils et son aide qui m’ont été précieux tout au long de ce stage, ainsi que mon tuteur, Mr Costera Adrian.

Ensuite, je remercierais Mr Nabeneza serge, le technicien qui s’occupe du laboratoire SPIR au CIRAD qui m’a toujours épaulé quand j’avais un problème avec les spectromètres ou la broyeuse.

Je tiens aussi à remercier toute l’équipe du pôle élevage qui m’a apporté son soutien au long du stage, ainsi qu’aux techniciens de l’ARP et de la coopérative SICArévia qui m’ont tant aider.

Je souhaite aussi dire merci à tous mes collèges du CIRAD et surtout à mes collocs de la case 19 !

Enfin un grand merci à mes parents, amis et à toute ma famille qui m’ont soutenu tout au long des 6 mois de stage.

Introduction

Les variations saisonnières des fourrages en qualité et en quantité sont l'un des problèmes majeurs touchant la filière bovine de la Réunion. De nombreux éleveurs tentent de pallier la baisse de production d'herbe en hiver par le stockage de fourrages issus de périodes d'excès. Cependant, comme dans la plupart des pays tropicaux, la conservation des fourrages peut difficilement se faire sous forme de foin à cause des précipitations importantes lors de la saison humide. L'utilisation du procédé d'ensilage, notamment sous forme de balles enrubannées, a permis de remédier au problème. En théorie, il rend possible une conservation assez longue ne modifiant que très peu la qualité du fourrage ensilé. En pratique, cela varie énormément entre les exploitations, selon l'espèce utilisée, la pratique de l'agriculteur et les conditions météorologiques. De ce fait, il est nécessaire de pouvoir adapter le conseil apporté à l'éleveur dans la satisfaction de ses objectifs de production en fonction de la situation qui lui est particulière. Ceci ne peut être possible qu'avec une connaissance précise et immédiate de la qualité nutritionnelle de l'ensilage.

L'analyse de la qualité et de la composition des fourrages est réalisée par des méthodes conventionnelles d'analyses chimiques en laboratoire. Néanmoins, ces méthodes sont coûteuses en temps, en argent et en matériel. Elles ne permettent pas d'estimer dans un intervalle suffisamment court la qualité des fourrages (Bruno-Soares et al. 1998). La spectrométrie proche infrarouge (SPIR), méthode physique basée sur la capacité des composés organiques à absorber le rayonnement infrarouge, permet d'estimer la composition chimique de l'échantillon dans un intervalle plus raisonnable. Depuis les années 90, la méthode développée sur les fourrages a gagné en précision et en fiabilité (Dardenne *et al.*, 1991; Waters and Givens, 1992; Shenk and Westerbaus, 1994 *in* (Bruno-Soares et al. 1998; Adesogan, Givens, et Owen 2000; Andueza, Munoz, et Garrido 2001; Andueza et al. 2005; Aufrere et al. 2006; Cozzolino, Acosta, et J. Garcia 2009). A la Réunion, la SPIR est déjà utilisée pour l'analyse de la composition des fourrages avec un spectromètre fixe, le Foss NIR System 5000 monochromator (Hiep 2009). Cependant, le délai entre le prélèvement de l'échantillon et l'envoi du résultat à l'agriculteur reste au mieux de quelques jours.

L'avancée des techniques a permis le développement de spectromètres proche infrarouge portatifs tels que le PhazIR™ (Polychromix, USA) ou l'ASD FieldSpec® 3. Leur utilisation à la ferme et en présence de l'éleveur permettrait une mesure immédiate des indices de qualité et donc un conseil adapté concernant la composition des rations ou encore la production, la conservation et la valorisation des fourrages. L'association Réunionnaise de Pastoralisme (ARP), associée au CIRAD, mène depuis deux ans un programme destiné au développement de l'outil SPIR portatif. La calibration des deux appareils portatifs est en cours pour les fourrages frais.

L'objectif de la présente étude est double. La première partie consiste en l'élaboration d'une calibration sur spectromètre proche infrarouge portatif ASD (le Phazir n'ayant pas encore pu être calibré à l'heure actuelle pour des raisons de délais) pour l'analyse en ferme de la qualité des ensilages d'herbe. La seconde partie étudie l'influence de différentes pratiques de l'éleveur liées à la réalisation de l'ensilage sur la qualité de l'ensilage produit. Le but ultime est l'obtention d'outils de conseil aux éleveurs, tant au niveau de la valeur de leur ensilage qu'au niveau de leurs pratiques.

Il faut souligner que cette étude complète celle réalisée en saison sèche (mars-août) par une autre stagiaire l'an passé. La présente étude étant réalisée en saison humide (septembre-février). La finalité étant de réaliser cette étude sur une période d'une année afin de prendre en compte toutes les variabilités liées à toutes les saisons.

1. Les facteurs de variation de qualité des ensilages : généralités

L'ensilage est une technique de conservation par voie humide, faisant appel à l'anaérobiose et à une fermentation acidifiante à dominante lactique. L'objectif d'une technique de conservation est la préservation de la qualité nutritionnelle du fourrage vert, récolté durant une période de surproduction, pour alimenter les animaux en période de déficit fourrager. La technique de l'ensilage, si elle est réalisée dans de bonnes conditions, devrait permettre de minimiser les pertes de matière sèche, de valeur alimentaire et d'éviter le développement de micro-organismes indésirables (Leclerc 2004; Titterton et Bareeba 2000; Paillat 1995; Paillat et al. 2000).

La libre disposition d'une base fourragère permanente est une priorité physiologique pour les ruminants, consommateurs prioritaires de fourrages, et une priorité économique pour l'éleveur, les fourrages verts fournissant l'apport énergétique et azoté le moins coûteux (Leclerc 2004). Il est donc très important que les animaux disposent dans leur ration d'une part conséquente de fourrages d'herbe.

1.1. Production de l'ensilage

Une fois l'herbe coupée et mise en milieu anaérobie il y a 4 phases (Titterton et Bareeba 2000; Paillat et al. 2000)
Phase aérobie : Durant quelques heures, l'oxygène présent initialement dans l'air et contenu dans la balle est consommé par le végétal ensilé et les bactéries aérobie et aérobie facultatives lors du processus de respiration et ce jusqu'à épuisement. Cette phase entraîne une perte de matière sèche sous forme de CO_2 et une diminution des glucides solubles ce qui diminue l'aptitude à la fermentation lactique et la valeur nutritive du fourrage. Les enzymes contenues dans les plantes continuent de fonctionner, régulant le pH autour de la valeur normale dans une plante à savoir entre 6 et 6,5. Elles provoquent l'hydrolyse des glucides solubles et des protéines, ce qui a pour conséquence la réduction de la proportion de protéines dans le fourrage.
Phase de fermentation : Une fois la totalité de l'oxygène consommé, les bactéries lactiques se développent et deviennent prédominantes au sein de la population microbienne présente dans l'ensilage. Si les fermentations se déroulent correctement, le pH de l'ensilage diminue jusqu'à une valeur comprise entre 5 et 3,8.
Phase de stabilisation : Si l'anaérobie est conservée, la totalité des micro-organismes tend à disparaître, hormis quelques organismes résistants à l'acide qui continuent à être actifs à de faibles niveaux. L'activité des enzymes cesse complètement à part celle de quelques protéases et carboxylases acide résistantes.
Phase de distribution : La détérioration des acides organiques conservateurs par les levures et des bactéries lactiques débute une fois l'ensilage mis au contact de l'air (lors de la distribution aux animaux ou si le plastique se déchire). Ceci provoque une remontée du pH ce qui entraîne la remontée en température et le redémarrage de l'activité d'organismes indésirables

La microflore présente dans les ensilages joue un rôle important dans le processus de conservation. Les organismes désirables permettent la mise en place des conditions nécessaires à une bonne conservation alors que les indésirables dégradent la qualité des aliments et ont un effet négatif sur la santé des animaux et la qualité du lait. Ces espèces et souches bactériennes, ainsi que les levures et les moisissures sont déjà présentes la plupart du temps sur le fourrage vert. Ils ont une action putréfiante sur le fourrage et vont donc à l'encontre de la conservation. Certaines bactéries anaérobies sont présentes sous forme sporulée.

Les bactéries lactiques, responsables de la bonne conservation du fourrage par la production d'acide lactique, sont les moins nombreuses. Leur présence est déterminée par la quantité d'origine et leur développement dépend du taux de sucres, de la matière sèche et de la composition des sucres mais aussi de leur tolérance à l'acidité et aux variations osmotiques. Elle est favorisée par le hachage du fourrage car elles se rencontrent principalement sur les tissus blessés du végétal.

1.2. Notion de qualité

1.2.1. Valeur alimentaire

- **Constituants organiques et leur digestibilité**

Pour exprimer la valeur nutritive d'un ensilage, le premier paramètre est la composition en constituants organiques et leur digestibilité dans le tube digestif de l'animal (INRA, Mise à jour 2010 2007). Les constituants glucidiques sont exprimés par la teneur en cellulose brute, la teneur en NDF, en ADF et en ADL.

Le Nuetral Detergent Fiber (NDF) est la fraction organique de la diète -en dehors des cendres brutes- qui est indigestible ou lentement digestible et qui occupe de la place dans le tube gastro-intestinal (cellulose, hémicellulose, lignine, cendres) (Agri Analysis Inc. 2009; Ampuero 2008; Ball et al. 2001; INRA, Mise à jour 2010 2007). Le NDF donne une indication sur la quantité de matière sèche qu'un animal peut consommer. Plus le NDF est élevé, moins l'animal consommera le fourrage.

La teneur en Acid Detergent Fiber (ADF) représente le contenu en cellulose, en lignine et en cendres de l'échantillon (Agri Analysis Inc. 2009; Ampuero 2008; Ball et al. 2001; INRA, Mise à jour 2010 2007). L'ADF donne une indication sur la digestibilité du fourrage: une valeur élevée indique un faible potentiel de digestion. Cette mesure est de moins en moins utilisée avec la venue de nouvelles analyses comme la NDFD.

La teneur en Acid Detergent Lignin (ADL) représente la fraction de NDF complètement indigeste présente sous forme de lignine (Ampuero 2008; INRA, Mise à jour 2010 2007).

La digestibilité d'un constituant correspond à la proportion de ce constituant qui disparaît dans le tube digestif. Dans le cas des constituants organiques, c'est la digestibilité de la matière organique qui est mesurée (dMO) ou celle de la NDF (NDFd).

- **Valeur azotée**

La valeur azotée des fourrages est exprimée en quantité de protéines digestibles dans l'intestin grêle (PDI). Etant donné la double origine de l'azote dégradé (les aliments ou la synthèse des protéines microbiennes des ruminants), il existe 2 valeurs PDI parallèles pour chaque aliment:
- la valeur PDIN qui représente sa valeur PDI s'il est inclus dans une ration déficitaire en azote dégradable ;
- la valeur PDIE qui représente sa valeur PDI s'il est inclus dans une ration où l'énergie est le facteur limitant de la synthèse microbienne.

La prévision de la teneur en PDI des aliments nécessite la prise en compte de 4 paramètres (Aufrere et al. 1989):
- la teneur en matières azotées totales (MAT)
- la dégradabilité théorique en sachets des matières azotées (DT) ;
- la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle (dr) ;

- la teneur en matière organique fermentescible (MOF), elle-même fonction de la teneur en matière organique digestible (MOD) et des teneurs en matières grasses (MG) et en matières azotées non dégradables dans le rumen (MAT x (1 - DT)).

1.2.2. Qualité de conservation

Les critères retenus pour déterminer la qualité et la stabilité des ensilages sont les suivants (Chuenpreecha et Odai 2002; Leclerc 2004) :

- **pH**

Révélateur de l'intensité de la fermentation lactique, il doit dans l'idéal être inférieur à 4 pour les graminées.

- **Acide lactique**

Principal responsable de l'acidification et de la qualité de l'ensilage, il provient de la dégradation anaérobie du glucose. Il est garant de la qualité de conservation.

- **Acide acétique**

Produit en début d'ensilage lors de la phase aérobie hétérolactique, il ne devrait pas dépasser 20 g/kg de MS d'ensilage. Si c'est le cas, cela indique un retard de la fermentation lactique et donc une consommation concurrentielle des sucres au détriment des bactéries lactiques. De plus, une teneur trop élevée d'acétate (plus de 40g/kg de MS d'ensilage) apporte un goût de vinaigre qui est peu apprécié par les animaux.

- **Acide butyrique**

Produit par les clostridies, il ne devrait pas dépasser 0,1 g/kg de MS. Les clostridies ont un effet négatif sur la quantité d'acide lactique produit et donc sur le pH, provoquent un gaspillage des sucres et des protéines et sont parfois pathogènes.

- **Ammoniac**

Exprimé en proportion d'azote ammoniacal par rapport à l'azote total, il indique l'état de dégradation des protéines de l'ensilage et doit être de l'ordre de 4 à 7. S'il dépasse les 10% (ou 20% s'il y a eu addition d'azote non protéique), il indique une protéolyse trop importante.

- **Alcool**

Produit par les ferments lactiques hétéro-fermentaires et les levures, sa présence en excès provoque des complications sanitaires et une baisse de production, en plus de conférer une saveur désagréable à l'ensilage lors de la reprise aérobie. Il doit, pour ces raisons, demeurer inférieur à 25 g/kg de MS.

- **Matière sèche**

Dans le cas des balles rondes pressées et enrubannées, l'absence de hachage et la richesse en MS orientent différemment les processus enzymatiques et fermentaires. Une quantité résiduelle d'air plus importante due à une densité de fourrage environ 30 % plus faible prolonge la respiration et retarde la fermentation. La libération des contenus cellulaires étant faible suite à l'absence de hachage, les jus ne mettent pas les sucres à disposition des bactéries, peu d'AGV sont formés et la température liée à l'échauffement fermentaire reste faible. Dans le cas des balles rondes, les conditions sont peu propices à la prolifération bactérienne et c'est la teneur en matière sèche qui reste le meilleur critère de conservation.

1.3. Facteurs influençant la qualité de l'ensilage

1.3.1. Aptitudes des fourrages à l'ensilage

- **Teneur en glucides solubles**

Contenus dans les cytoplasmes et solubles dans l'eau, les glucides solubles tels que le glucose, saccharose, fructose ou encore les fructosanes, sont fermentés par les bactéries lactiques, contrairement à l'amidon non soluble (Leclerc 2004; Paillat 1995; Paillat et al. 2000). Plus leur concentration est élevée plus l'acidification sera importante.

La teneur en sucre soluble dépend selon le type de fourrage ensilé : alors que les espèces tempérées accumulent les sucres dans les tiges et les feuilles et les fructosanes dans les tiges, les espèces tropicales accumulent les sucres prioritairement dans les tiges et l'amidon dans les feuilles (Jarrige, 1980 in Paillat, 2000). Lors de la fauche, une grande partie de la tige reste au sol et n'est donc pas ensilées. Ceci rend les graminées tempérées sensiblement plus aptes à l'ensilage que les graminées tropicales.

Par ailleurs, la teneur en sucre solubles varie :

- au cours du cycle de végétation, en raison de l'augmentation de la quantité de tiges : pour un même fourrage, la teneur en sucres solubles sera plus importante à un stade jeune (feuille) qu'à un stade tardif (épiaison) (Paillat, 2000).
- au cours de la journée avec une valeur plus importante en fin de journée suite à l'accumulation de produits de la photosynthèse de la journée.
- selon l'intensité de l'ensoleillement et la température de la journée : elle diminue avec la chaleur et l'ennuagement ce qui est régulièrement le cas dans les Hauts de la Réunion.
- Avec la fertilisation azotée qui, quand elle est forte, a tendance à diminuer la teneur en glucides solubles et l'accumulation de fructosanes (Smith, 1973 et Isselstein, 1993 in Paillat, 2000).

- **Pouvoir tampon**

Le pouvoir tampon d'un fourrage représente sa capacité à résister à un abaissement de son pH. Il est d'autant plus élevé que la plante est riche en matières azotées et en minéraux (Leclerc 2004; Paillat 1995; Paillat et al. 2000). L'acidification du fourrage récolté est nécessaire pour assurer sa conservation.

- **Teneur en matière sèche**

La teneur en matière sèche du fourrage au moment de la récolte joue un rôle important sur le processus de fermentation, l'évolution des micro-organismes indésirables et les pertes occasionnées lors de la conservation (Leclerc 2004). Plus la teneur en MS du fourrage est basse, plus l'acidification devra être importante car un milieu très humide favorise des conditions anaérobies totales et donc le développement de clostridies, bactéries dont l'activité dégrade la qualité nutritionnelle de l'ensilage (Titterton et Bareeba 2000).
Par ailleurs, la teneur en matière sèche du fourrage à la fauche détermine celle du produit obtenu à la fin du processus d'ensilage. Or, la quantité de matière sèche contenue dans l'ensilage distribué dans la ration détermine l'ingestion de ce fourrage par les animaux (Paillat et al. 2000).

1.3.2. Facteurs liés au milieu et à la technique

Le taux de matière sèche au sein de l'ensilage est fortement influencé par les paramètres climatiques selon Paillat (2000). Pluie, couverture nuageuse et humidité de l'air vont fortement ralentir la dessiccation du fourrage par la saturation de l'air en eau ou par l'ajout d'eau sur le fourrage alors qu'un temps venteux et/ou ensoleillé aura l'effet inverse. (Cabon, 1987 in Paillat, 2000)

La dessiccation peut être améliorée par des techniques de fanage du fourrage une fois fauché. Le préfanage est une technique où le fourrage séjourne sur le sol plus ou moins longtemps (de 1 à 3 jour) après la fauche alors que lors du ressuyage, le fourrage reste au sol pendant un temps plus court (<24 h) et la teneur en matière sèche est proche de 25 % (Leclerc 2004).

Selon Barbet-Massin, la quantité de fourrage présente au moment de la fauche est elle aussi déterminante de la dessiccation : un rendement supérieur à 4 tonnes de MS/ha implique une quantité d'herbe trop importante au sein des andains et donc diminue la possibilité de séchage. Le conditionnement (type de faucheuse, fanage, presse), les conditions de réalisation (hachage, tassage) et les conditions de stockage (couleur et état du plastique, position et lieu de stockage de la balle, durée de stockage) influent aussi directement sur les fermentations en impactant la quantité d'oxygène présent dans l'ensilage à la fermeture et au cours des processus fermentaires.

L'utilisation d'adjuvants est une autre technique utilisée pour influencer la qualité des fermentations. Ils permettent l'amélioration de la fermentation en augmentant la quantité de sucres solubles (mélasse) ou la teneur en acides lactiques (ferments lactiques) (Kim et Uchida 1991; Oude Elferink et al. 2000; Paillat 1995)

1.3.3. Caractéristiques organoleptiques

L'appétence est déterminée par les caractères organoleptiques tels que l'odeur, la consistance et la couleur (Boessinger 2009; Leclerc 2004). Or, l'appétence est directement lié à la quantité ingérée et donc à la rentabilité de l'alimentation.

L'odeur permet le contrôle des mauvaises fermentations, des échauffements ou la présence de levures ou de moisissures. L'odeur recherchée est une odeur agréable, légèrement acide et aromatique alors qu'elle est rejetée si elle est désagréable.

La couleur permet le contrôle des conditions météo lors du préfanage et de la présence de mauvaises fermentations ou moisissure. Les modifications chimiques altèrent la couleur, en faisant un indice de qualité (Leclerc 2004; Paillat 1995). Suite à l'altération de la chlorophylle par les acides organiques, l'ensilage devrait prendre une couleur brun clair. Si la couleur brune est très prononcée la totalité du carotène est détruite ce qui est signe d'un échauffement anormal (Paillat 1995)Si la couleur de l'ensilage est différente du brun, il s'agit souvent d'un signe de contamination fongique (Leclerc 2004).

Enfin, la consistance recherchée pour un ensilage appétissant est une consistance conservant les structures de base des feuilles et des tiges. Si les fractions de tiges et de feuilles ne se distinguent pas et si la consistance est molle ou pâteuse, l'ensilage sera probablement rejeté.

1.4. Echelle d'évaluation de la qualité de l'ensilage

1.4.1. Teneur en matière sèche

D'après J.M. Paillat (commentaire personnel, 2011), l'un des paramètres incontournables pour une évaluation rapide de la qualité de l'ensilage est la teneur en matière sèche. Les ensilages en balles enrubannées sont mieux conservés lorsque la teneur en MS est élevée (Paillat 1995). Lors des enquêtes menées en 1995, plusieurs classes de qualité de conservation avaient pu être mises en place (Tableau 1)

Tableau 1 Qualité de conservation des ensilages en balles enrubannées en fonction de la MS (Paillat 1995)

Classe	Teneur en MS (%)
Mauvais	<22
Médiocre/Moyen	22 - 27
Moyen/Bon	27 - 40
Excellent	>40

Ces valeurs varient en fonction de l'ensilage : pour les ensilages de fourrage tempéré, une matière sèche supérieure à 27% garantit une qualité correcte. Dans le cas du kikuyu, c'est au dessus de 40% de matière sèche que l'on obtiendra une qualité de conservation suffisante, étant donné le faible potentiel du kikuyu à l'ensilage.

1.4.2. Barème INRA d'appréciation de la qualité de conservation des ensilages

Tableau 2 Barème INRA d'appréciation de la qualité de conservation des ensilages (INRA, Mise à jour 2010 2007)

Appréciation	pH	AGV totaux	Ac. Acét	Ac. Buty	Azote ammoniacal (% NT)	N Soluble
		Mmoles/kg MS	g / kg MS			% N total
Excellent	<4	<330	<20	0	<7	<50
Bon	<4,2	330 – 660	20 - 40	<5	7-10	50 - 60
Médiocre	<4,4	660 – 1000	40 - 55	>5	10-15	60 - 65
Mauvais	<5	1000 – 1330	55 - 75	>5	15-20	>65
Très mauvais	>5	>1330	>75	>5	>20	>75

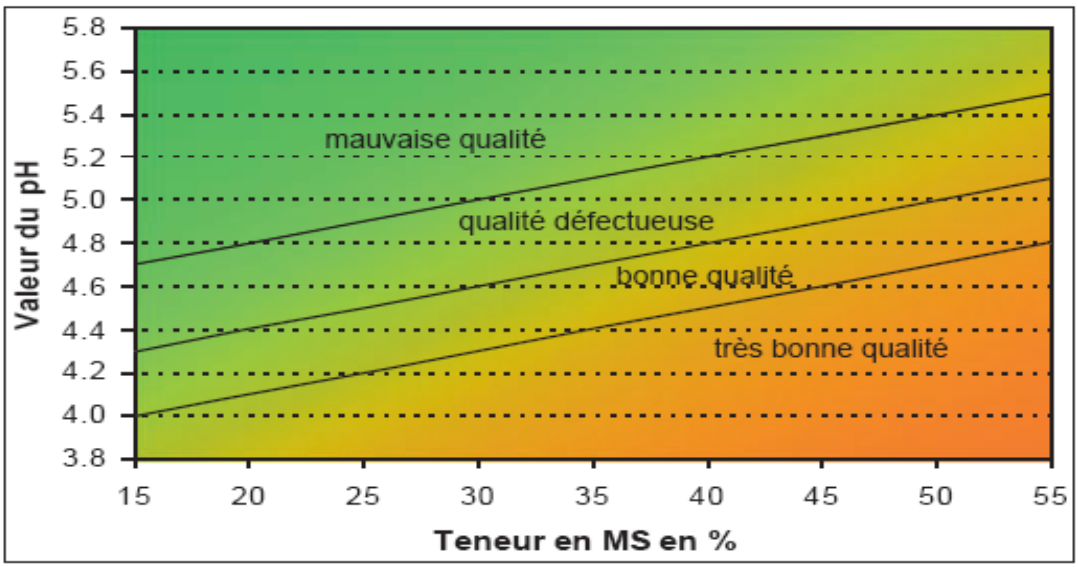

Figure 1 Appréciation des ensilages selon la valeur du pH en relation avec la teneur en matière sèche (MS) (source: Wiss, 2007)

2. La spectroscopie proche infrarouge (SPIR) comme outil pour l'analyse des aliments

2.1. Principe

Introduite dans les années 60 pour la mesure de l'humidité dans les grains, la SPIR est une méthode analytique basée sur le principe d'absorption partielle et sélective du rayonnement dans le proche infrarouge (800 à 2500 nm) de la matière organique (Bertrand et Dufour 2006). Cette absorption étant liée à la composition chimique des échantillons, on peut estimer cette dernière par la simple mesure de l'absorption de lumière par l'échantillon. (Laboratoire d'alimentation animale du Cirad 2007).

La lumière blanche est composée de plusieurs domaines. La région proche infrarouge s'étend du visible à la région infrarouge (700-3000 nm) (Norris, 1989). Cependant, la plus part des analyses réalisées en proche infrarouge se font entre 1100 et 2500 nm. Quand un produit est irradié par un rayon lumineux, une partie de l'énergie générée par le rayon est absorbée par l'échantillon et l'autre réfléchie. Les liaisons chimiques contenues dans les molécules organiques vibrent, s'étirent ou entrent en rotation différemment selon les longueurs d'onde. Les longueurs d'onde pour lesquelles les liaisons ne réagissent pas sont réémises. Le spectromètre projette une quantité connue de lumière proche infrarouge (I_0) et mesure la quantité réfléchie (I_r) sous forme de valeur d'absorption à l'aide de la réflectance ($R= I_r/I_0$). L'absorption est le logarithme de l'inverse de la réflectance ($A = \log 1/R$).

2.2. Intérêt et limites

Cette méthode a de nombreux intérêts (Adesogan, Givens, et Owen 2000; De Boever et al. 1996; Laboratoire d'alimentation animale du Cirad 2007). Sa rapidité permet d'obtenir en quelques minutes l'absorbance d'un échantillon en faible quantité et sans le détruire. Il faut cependant prendre garde à la représentativité de l'échantillon utilisé et donc privilégier malgré tout l'utilisation d'une quantité conséquente. Le coût de cette technique est avantageux : hormis l'investissement initial dans l'appareil et la constitution des « calibrations » pour chaque produit, le coût de passage des échantillons est très faible. Il faut simplement prévoir quelques analyses de référence au laboratoire pour vérifier que la calibration reste correcte au cours du temps et bien adaptée aux nouveaux échantillons.

Cependant, la SPIR ne peut généralement pas être utilisée pour estimer les substances minérales puisqu'elle est basée sur l'absorption du rayonnement par les molécules organiques. De plus, dans la plupart des cas, les substances présentes à l'état de traces dans les échantillons ne peuvent pas être prédites par la technique car le signal spectral leur correspondant est trop faible.

2.3. Application en nutrition des animaux

Apparue dans les années 60, l'utilisation de la spectrométrie proche infrarouge dans le domaine de la nutrition des animaux est connue depuis les années 80 comme une technique plus fiable que l'analyse conventionnelle en laboratoire (William et Norris, 1987 *in* (Garrido-Varo 1997). La première mesure de qualité des fourrages a été rapportée par Norris *et al* en 1976. Ils ont obtenu des erreurs standard de 0,95 % pour les protéines brutes, 3,1% pour les NDF, 2,5% pour les ADF 2,1% pour la lignine et 3,5% pour la digestibilité de la matière sèche. Ces résultats ont grandement participé au lancement de la SPIR en tant que technique de mesure de la qualité des fourrages. En 1988, la SPIR est devenue la méthode officielle de l'Association of Official Analytical Chemists pour la mesure des protéines brutes et des ADF dans les fourrages (Barton et Windham, 1988 *in* (Deaville et Flinn 2000).

Depuis, la mesure de la qualité des aliments, notamment celle des fourrages, a été l'objet de nombreuses recherches (Stuth, Jama, et Tolleson 2003).

De nombreuses publications ont montré le succès de l'utilisation de la SPIR pour la mesure de plusieurs composants organiques : les fractions protéiques et fibreuses, les sucres solubles ou encore la matière sèche. La Matière Azotée totale est la variable la plus commune dans les mesures effectuées par SPIR (Stuth, Jama, et Tolleson 2003). Cette mesure est fiable avec l'obtention de coefficients de détermination R^2 au dessus de 0,95 dans la plus part des cas (Andueza, Munoz, et Garrido 2001; De Boever et al. 1996; Bruno-Soares et al. 1998; Cozzolino, Acosta, et J. Garcia 2009; Norris et al. 1976; Sinnaeve et al. 1994; Valdes et al. 2006). Ceci est du à la forte absorption du groupement –N-H en proche infrarouge ainsi qu'à l'importance de la teneur en protéine dans les fourrages (Roberts *et al.,* 2003 *in* (Stuth, Jama, et Tolleson 2003).

Par ailleurs, la SPIR permet de prédire les fractions protéiques qui sont associées aux fibres (NDF-IP et ADF-IP). Valdés *et al*. (2006) ont obtenu des équations de prédiction fiables pour mesurer ces fractions (R^2 = 0,91 et 0,72 ; SEcv = 0,66 et 0,77% pour NDF-IP et ADF-IP, respectivement). Les fibres sont elles aussi fréquemment estimées par la SPIR grâce à la variation des liaisons –C–H et –O–H (Bertrand et Dufour 2006; Stuth, Jama, et Tolleson 2003). Mentik *et al*. (2006) prédisent la teneur en NDF avec un R^2 supérieur à 0,85 alors que les teneurs en NDF et ADF ont pu être prédites par l'INRA (2011) avec des R^2 de 0,98 et 0,96 respectivement et des SEcv de 14,1 et 11,7.

La digestibilité des constituants alimentaires est un paramètre important pour évaluer la qualité des fourrages ingérés par les ruminants. Comme les protéines et les fibres, la digestibilité des tissus végétaux est communément estimée par la SPIR. Les calibrations mises en place pour la mesure de cette variable sont basées sur des méthodes in vivo et in vitro et sont sensibles aux moisissures contenues dans les échantillons. N'étant pas un paramètre chimique mais la résultante des propriétés du fourrage, la digestibilité peut être plus délicate à estimer par la SPIR. Cependant, Andueza (2001) conclue que l'équation SPIR développée pour la prédiction de la digestibilité de la matière organique (DMO) donne une valeur de R^2 égal à 0,92. Castro (1997) a développé des équations pour prédire la DMO des ensilages d'herbe. Il a trouvé non seulement de bonnes valeurs de R^2 et SEP égal à 0,90 et 2,25% avec des échantillons secs mais des valeurs acceptables avec des échantillons frais (0,77 et 3,77% pour R^2 et SEP, respectivement). Plus récemment, Decruyenaere *et al*. (2008) ont réussi à prédire la DMO des fourrages avec R^2 qui varie de 0,86 à 0,90.

Pour finir, la matière sèche est bien estimée par la SPIR. (Mentink, Hoffman, et Bauman 2006) la prédisent avec un R^2 supérieur à 0.85. Pour Cozzolino *et al.* (2009), la matière sèche est même le paramètre le mieux prédit par la SPIR avec un R^2 de 0,97.

La SPIR permet donc de mesurer fidèlement la valeur alimentaire des ensilages. Concernant la qualité de conservation des ensilages, c'est-à-dire les caractéristiques des fermentations, Park *et al. in* Deaville et Flynn, 2000) ont montré en 1997 qu'il était possible de les estimer fidèlement à l'aide de la SPIR sur des ensilages frais.

D'après Bertrand et Dufour (2006), l'erreur (RMSEP) de la prédiction avec le SPIR varie selon le constituant analysé de 0,16 à 0,45 %, 0,20 à 1,00 % et 0,15 à 0,80 % pour la protéine, les glucides et l'eau, respectivement, tandis que l'erreur pour la prédiction des lipides est très diverse.

3. Contexte de l'étude et dispositif expérimental

La Réunion est une île tropicale de l'hémisphère sud (55°29' de longitude Est et 21°53' de latitude Sud), située à 800 km à l'est de Madagascar. Elle appartient à l'archipel des Mascareignes.

3.1. Contexte de l'étude

3.1.1. Contexte physique

3.1.1.1. Particularités morphopédologiques

Île volcanique de formation récente, la Réunion est issue de l'activité d'un point chaud. Cette origine lui confère un relief accidenté avec deux massifs volcaniques (le Piton des Neige, volcan éteint point culminant de l'île à 3069 m et le Piton de la Fournaise encore en activité). Entre ces deux sommets s'étend une vaste zone de plaines d'altitudes (Blanfort 2000; Zebrowski 1975). Ce relief particulier sépare les surfaces agricoles en plusieurs zones. Jusqu'à 800 m d'altitude, les sols sont en majorité occupés par la canne sucrière. Au dessus, les zones de plaines d'altitude sont accidentées. Pour cette raison, leur utilisation est dédiée à l'élevage. De grands troupeaux laitiers et allaitants évoluent sur des prairies destinées à la confection de fourrages avec des surfaces réservées au parcours de troupeaux allaitants au dessus de 1500 m.

Les andosols, issus des cendres volcaniques, recouvrent près de 80 % du territoire. Pauvres en azote et en phosphore assimilable, ils présentent des caractéristiques physiques, hydriques et mécaniques qui rendent leur mise en culture très influente sur les couches superficielles et augmentent leur sensibilité naturelle à l'érosion. Au dessus de 1200 m, ils deviennent perhydratés. Pour cette raison, la mise en place de prairies pérennes ou annuelles est la meilleure alternative sur ces zones, les couverts herbacés étant particulièrement antiérosifs.

3.1.1.2. Particularités climatiques

Le climat est tropical humide avec deux saisons majeures : l'hiver austral, saison sèche s'étendant d'avril à octobre/novembre et l'été austral, saison des pluies s'étendant de décembre à mars (Blanfort 2000; Zebrowski 1975). Cependant, le relief très accusé de l'île a une influence importante sur le climat, divisant l'île du Nord au Sud en deux « côtes » au climat distinct : la « côte au vent », orientée nord-est face aux alizés, reçoit 70 % des précipitations (3 à 10 m/an) alors que la côte sous le vent, orientée sud-ouest, reçoit moins de 2m/an et de façon très irrégulière et connaît donc une saison sèche très marquée. Ces tendances sont nuancées par le gradient altitudinal : la pluviométrie et l'humidité augmentent alors que les températures diminuent avec l'altitude (la température moyenne décroît avec l'altitude de 0,6 à 0,8°C par 100 m), transformant le climat tropical du littoral en climat tempéré dans les Hauts (Blanfort 2000; Zebrowski 1975).

Ce contexte climatique particulier paramètre le fonctionnement des systèmes herbagers que l'on retrouve en altitude (Blanfort 2000; Choisis et al. 2009). En effet, les pluies abondantes de la saison humide entraînent une pousse rapide de l'herbe dont résulte souvent un surplus de matière. A la saison fraîche, la baisse des températures dans les Hauts et la diminution des précipitations provoquent une réduction de la croissance végétative. La conséquence de ce déséquilibre dans la pousse de l'herbe est directement liée à la problématique de l'ensilage à la Réunion.
Ceci a aussi influencé l'installation des élevages dans les hauts. L'index THI (Temperature Humidity Index) permet d'apprécier le confort thermique des bovins en régions chaudes (Johnson, 1980 *in* (Tillard 2007)).

Il est supérieur à 70 en dessous de 800 m durant la période comprise entre novembre et mai. Cela implique une température rectale élevée des animaux, une baisse de l'ingestion de matière sèche, de la productivité et de la fertilité. Au-delà de 800 m, les températures sont identiques à celles retrouvées en zones tempérées et ne sont plus pénalisantes pour la productivité. Ce sont dans ces zones que se sont installées les exploitations bovines.

3.1.2. L'élevage bovin à la Réunion

Introduit à la Réunion à la fin du XVIIIe siècle, l'élevage bovin a connu de fortes évolutions à partir des années 70, notamment grâce au plan de développement des Hauts (Galan et al. 2009; Mandret 2000; Naves, Lebon, et Collin 2009) et aux nombreuses subventions accordées.

Aujourd'hui, la filière bovine à la Réunion est en plein essor : les filières bovines viande et lait génèrent une valorisation de près de 42,1 millions d'euros et couvrent entre le quart et la moitié de la demande locale (Tableau 3).

Tableau 2 Chiffres filière bovine 2007 (Agreste)

	Filière viande	**Filière lait**
Nombre de vaches	11950	4800
Production	1915 t de carcasse	246 535 hl de lait
Couverture de la demande locale	26 %	48%

La situation démographique entraîne une grande pression des zones urbaines sur les zones agricoles, remarquablement imbriquées à la Réunion (AGORAH 2006). L'augmentation de la production de la filière bovine ne passe par une extension des surfaces et une augmentation du nombre d'exploitations mais par l'intensification de l'élevage dans les zones qui lui sont déjà dédiées (De Rouffignac, Choisis, et Salles 2005; Choisis et al. 2003)

Cette intensification doit cependant faire face à la notion d'agriculture durable qui s'est largement répandue dans les sociétés (Hiep 2008; Hiep 2009). A la Réunion, les élevages ont basé leur alimentation sur les fourrages cultivés sur l'île mais aussi en grande partie sur l'alimentation par concentrés : un récent rapport des réseaux de référence réunionnais estime à 650 g/litre de lait produit la consommation de concentrés dans les fermes laitières (Programme POSEI France 2009). Cette valeur est près de 3 fois la quantité intégrée en moyenne dans les rations de vaches laitières en France métropolitaine (Programme POSEI France 2008). Cette pratique va à l'encontre des enjeux environnementaux et économiques de l'exploitation, en plus d'être défavorable à la santé animale. La composition des rations doit évoluer en faveur des fourrages d'où la nécessité d'en connaître la valeur alimentaire.

3.1.3. Production fourragère

Sur une surface de 252 000 ha à la Réunion, mois d'un quart est consacré à l'agriculture : 47 479 ha de SAU dont 24 % utilisés pour l'élevage (INSEE 2008; P. Grimaud et Thomas 2002; Chambre d'Agriculture de la Réunion 2008). La surface toujours en herbe représente environ 11 000 ha (Agreste). Quant aux terres arables réservées à la culture fourragère, elles recouvrent 2060 ha en 2008 soit une augmentation de 40 % en 20 ans (INSEE 2008). Cette amélioration a été permise par les éleveurs adhérents aux A.R.P dont l'ambition a été durant de nombreuses années de contribuer de façon significative à l'aménagement des Hauts en créant et entretenant des prairies, en finançant les équipements et en apportant des conseils aux éleveurs (Devimieux et al. 2000; Paillat 1995). Hormis au niveau des Plaines, les surfaces fourragères étaient rarement mécanisables et sont par conséquent réservées au parcours (Barbet-Massin et al. 2004; Paillat 1995).

Depuis la création des ARP, avec un aménagement parcellaire, il est possible d'améliorer la mécanisation des parcelles et donc de produire de l'ensilage (Tableau 4).

Tableau 3 Cultures fourragères 2009 à la Réunion (Agreste)

Indicateur	**Superficie développée (ha)**	**Rendement matière sèche (100 kg/ha)**
FOURRAGES ANNUELS	820	-
Maïs fourrage et ensilage (plante entiére)	120	120.00
dont maïs fourrage irrigué	120	120.00
Autres fourrages annuels	700	-
PRAIRIES NON PERMANENTES ET STH	12640	70.11
Prairies artificielles	40	180.00
Prairies temporaires	1200	160.00
Prairies naturelles ou semées depuis plus de 6 ans	9700	64.69

L'importance du gradient altitudinal et l'irrégularité de l'intensité et de la répartition des pluies, évoquées précédemment, ont engendré des types de végétations contrastés entre les Bas et les Hauts et d'Est en Ouest (P. Grimaud et Thomas 2002; Paillat 1995). Dans les Hauts, les conditions pédoclimatiques impactent la pousse de l'herbe dont la production ralenti durant l'hiver. Le climat, plutôt tempéré, est propice au développement de graminées tempérées dominantes aux altitudes les plus hautes (Barbet-Massin et al. 2004; P. Grimaud et Thomas 2002; Mandret 2000; Paillat 1995) (Figure 2). En descendant en altitude ces graminées sont associées au kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) qui prédomine dans les systèmes prairiaux en dessous de 1 200 m. Les graminées tropicales se retrouvent dans les Bas.

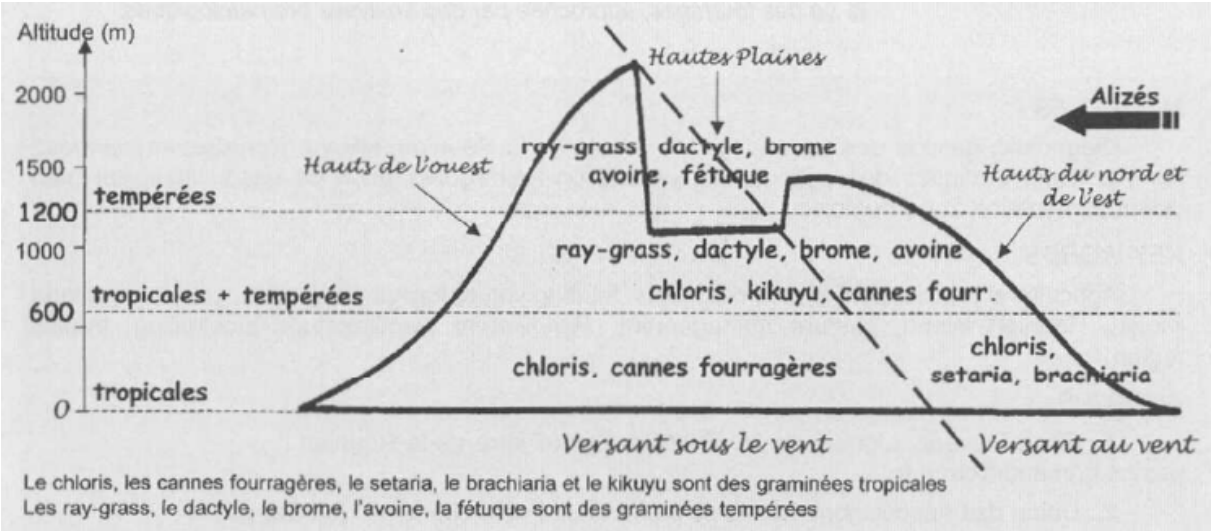

Figure 2 Diversité des grainées dans les systèmes prairiaux réunionnais (P. Grimaud et Thomas 2002)

Selon le type de production et la localisation, les fourrages sont consommés de différentes façons.

Les troupeaux naisseurs et parfois laitiers, principalement installés dans les Hauts, bénéficient de larges espaces de pâture où ils sont conduits selon un système de pâturage tournant (P. Grimaud et Thomas 2002). Les élevages installés dans les Bas, les engraisseurs, sont installés en hors sols. Ils ne consomment alors les fourrages que sous forme d'ensilage et parfois en vert, mais cette pratique tend à disparaître avec le temps. Dans tous les cas, lors de la période d'hiver, le déficit herbagé oblige les exploitants à distribuer les rations fourragères sous forme d'ensilage : les baisses de production varient de 20% pour le ray-grass à près de 45% pour le dactyle avec une valeur intermédiaire de 33% pour le kikuyu (P. Grimaud et Thomas 2002; Mandret 2000).

3.1.4. Ensilage en balles rondes

L'ensilage d'herbe en balles enrubannées est utilisé depuis les années 90 par les éleveurs pour augmenter la quantité d'herbe ensilée et donc la productivité de la terre (Cowan 2000; Paillat 1995). Il permet à la fois de combler le déficit fourrager hivernal et d'améliorer la gestion des prairies en période estivale (Paillat 1995).
L'ensilage est préféré au foin à la Réunion, surtout dans les hauts : les hautes températures alliées à de courtes saisons des pluies sur des sols généralement pauvres permettent de bons rendements mais une détérioration rapide de la qualité nutritionnelle après trois mois de pousse (Titterton et Bareeba 2000). Les protéines et la digestibilité diminuent fortement lorsque la lignification débute après la floraison. Il apparaît donc la nécessité de couper à un stade jeune c'est à dire à une période où les pluies sont encore fortes et les rosées matinales et brouillards sont importants (Paillat 1995; Titterton et Bareeba 2000). Dans ces conditions, il est difficile de faire du foin.

L'ensilage en silo, testé à partir de 1987, a donné des résultats peu concluants: moins d'un tiers des ensilages étaient bien conservés et le temps de confection des silos très élevé (Paillat 1995), sans compter le coût de la technique et l'espace utilisé. L'ensilage en silo a été remplacé par l'ensilage en balle très rapidement après l'arrivée de la technique sur l'île dans les années 90.

3.1.5. Espèces utilisées pour l'ensilage

3.1.5.1. Tempérées

Les graminées tempérées son principalement cultivées au dessus de 800 m d'altitude à la plaine des Cafres, la plaine des Palmistes, dans les Hauts du Sud et les Hauts de l'Ouest.

- **Dactyle**

Le dactyle (*Dactylis glomerat*a) est une graminée vivace de grande taille s'enracinant profondément ce qui le rend bien résistant à la sécheresse (Paillat, 1995 ; Paillat *et al.*, 2000 ; Barbet-Massin *et al.*, 2004). Cette espèce pourrait se prêter aisément à l'ensilage, notamment grâce à sa fauche très aisée. Cependant, le rapport glucides solubles sur matières azotées totales, indicateur potentiel d'aptitude à l'ensilage, est en moyenne de 0,26 ce qui est faible.

- **Le Ray-grass**

Les ray-grass (*Lolium perenne, lolium multiflorum, lolium hybridum*) sont des graminées pérennes à enracinement superficiel (Paillat, 1995 ; Paillat *et al.*, 2000 ; Barbet-Massin *et al.*, 2004). Il est bien consommé par les animaux au stade feuillu, ce qui permet de l'exploiter à un stade plus tardif même si sa sensibilité à la rouille le rend plus propice au rejet par les animaux dans le cas où il serait infecté. Le rapport GS/MAT est de 0,43 en moyenne pour le ray-grass anglais à un stade de 35 jours ce qui le prêterait plus à l'ensilage que le dactyle.

- **Brome (*Bromus catharticus*)**

Le Brome est une espèce à l'enracinement puissant qui s'installe facilement et rapidement. Il est principalement utilisé en fauche pour la réalisation d'ensilage grâce à sa richesse en sucres solubles : le rapport GS/MAT est en moyenne de 0,38 (Paillat *et al*. 1995).

- **Fétuque élevée (*Fetusca arundinacea*)**

La fétuque est une espèce vivace de grande taille poussant en grosses touffes et pouvant également émettre de courts stolons. Elle est rustique ce qui permet son utilisation dans des zones aux conditions difficiles. C'est une espèce qui possède une bonne aptitude à la dessiccation ce qui en fait une bonne espèce pour la réalisation d'ensilage.

- **Lofa**

Le Lofa est un hybride tétraploïde de ray-grass d'Italie croisé par de la fétuque élevée. C'est une espèce moins touchée par les variations saisonnières : il reste plus vert en été et en hiver, • dure de 2 à 3 ans, a une valeur alimentaire très élevée.

- **Trèfle blanc (*Trifolium repens*)**

Le trèfle blanc est une légumineuse herbacée pérenne dont les tiges sont des stolons ramifiés rampant sur le sol. Il est cultivé en association avec les prairies de graminées fourragères où il améliore la qualité de l'herbe s'il est présent sur plus d'un tiers de la prairie grâce à sa capacité de fixer l'azote de l'air.

3.1.5.2. Tropicales

Les graminées tropicales sont répandues partout autour de l'île. Elles se retrouvent du niveau de la mer à des altitudes relativement élevées. Cependant, à partir d'un certain niveau, leur productivité est fortement réduite par les conditions climatiques hivernales.

- **Kikuyu**

Le kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) est une graminée tropicale d'altitude présente entre 600 m et 1500 m (Paillat, 1995, Paillat *et al*. 2000 ; Barbet-Massin, 2004). C'est une plante antiérosive très bien adaptée aux zones de pâturage en pente, d'autant plus qu'elle est très appétée par les animaux et qu'elle résiste particulièrement au piétinement. Néanmoins, cela rend sa fauche difficile même si l'ensilage de kikuyu est pratiqué. Le rapport GS/MAT est très faible par rapport aux graminées tempérées. Sa valeur est en moyenne de 0,18 et varie de 0,09 à 0,33 entre 15 et 110 j de repousse, l'aptitude à l'ensilage est donc mauvais quelque soit l'âge.

- **Chloris**

Le chloris (C*hloris gayana*) est une graminée tropicale surtout exploitée en fauche pour la production de foin en zone littorale mais depuis quelques années il sert aussi à la réalisation

d'ensilage. Le rapport GS/MAT est en moyenne de 0,36 ce qui est meilleur que le kikuyu. Il s'ensile donc assez facilement en apportant une quantité de mélasse suffisante (Paillat, 1995).

- **Brachiaria**

Les brachiaria (*Brachiaria decumbens, B. ruzizienzis, B. himidicola*) sont des graminées tropicales pérennes particulièrement résistantes sur les sols tropicaux peu fertiles, notamment grâce à leur enracinement important (Paillat *et al*. 2000).

- **Cynodon dactyle (*Cynodon dactylon*)**

Autrement appelé Ti-foin, Chiendent amélioré ou chiendent pied de poule, le cynodon dactyle est une graminée vivace rhizomateuse pourvue de stolons. C'est une espèce qui tolère bien la sécheresse ainsi qu'un piétinement intensif.

- **Canne fourragère**

Le terme cannes fourragères regroupe plusieurs espèces fourragères ayant en commun une certaine ressemblance avec la canne à sucre. Il s'agit souvent de *Pennisetum purpeum*. Il en existe de nombreuses souches à la Réunion dont les productions sont très variables et qui sont plus ou moins bien adaptées à l'altitude.

La valeur alimentaire des graminées tropicales est nettement plus faible à un stade plus jeune que celle des graminées tempérées. Ceci implique leur exploitation à un stade jeune et donc un compromis entre productivité et qualité du fourrage.

3.2. Enquête et population ciblée

Cette étude a pour but la caractérisation de la qualité des ensilages d'herbe à la Réunion et d'en hiérarchiser les différents déterminants. L'enquête doit donc s'intéresser à la production d'une calibration de l'ASD afin de mesurer la qualité des échantillons prélevés mais aussi aux potentiels facteurs de variation de cette qualité c'est-à-dire aux pratiques de l'éleveur.

3.2.1. Choix des éleveurs

La calibration doit contenir toutes les sources de variation qu'il est possible de retrouver dans la population utilisée (Shenk and Westerhaus, 1994 *in* Deaville et Flynn, 2000, Bertrand *et al.*, 2006). L'échantillonnage peut alors se faire de manière aléatoire ou alors de manière réfléchie en sélectionnant des échantillons représentatifs au sein d'une population large en fonction des caractères sources de variation (Deaville et Flynn, 2000). Ceci suppose une connaissance préalable de la population étudiée. Cette connaissance est fournie par les bases de données de l'ARP dont les techniciens assistent de nombreux éleveurs adhérents dans la gestion et la valorisation de leurs prairies.

Afin de couvrir le maximum de variabilité de qualité des ensilages, la sélection des fermes s'est faite à partir de critères objectifs : espèce ensilée (Chloris, Kikuyu, Brachiaria, Brome Ray-grass, Dactyle et céréales) et type d'élevage (Laitier, Naisseur, Mixte, Naisseur/Engraisseur, Engraisseur). La sélection a aussi utilisé un critère basé sur le jugement des techniciens de l'ARP concernant la qualité moyenne de l'ensilage produit dans les fermes concernées : Bon, Moyen, Mauvais.
Le nombre d'éleveurs à enquêter est fixé à 50 au minimum. Ce nombre est déterminé par la disponibilité en moyens humains et le nombre d'échantillons souhaités. Au total, avec environ 420 élevages bovins à la Réunion, la pression d'échantillonnage au niveau des éleveurs s'élève à 12%

3.2.2. Données recherchées

Selon la bibliographie, la qualité nutritionnelle et la conservation sont influencées par différents éléments :

- Le fourrage utilisé pour l'ensilage : la composition floristique de la prairie avec la répartition des différentes espèces, l'âge de la prairie, l'âge du fourrage à la fauche et le stade du fourrage à la fauche (stade 1 : Feuille, Stade 2 : Montaison, Stade 3 et 4 : Epiaison, Stade 5 : Floraison ou Lianes dans le cas du Kikuyu) (Figure 3).

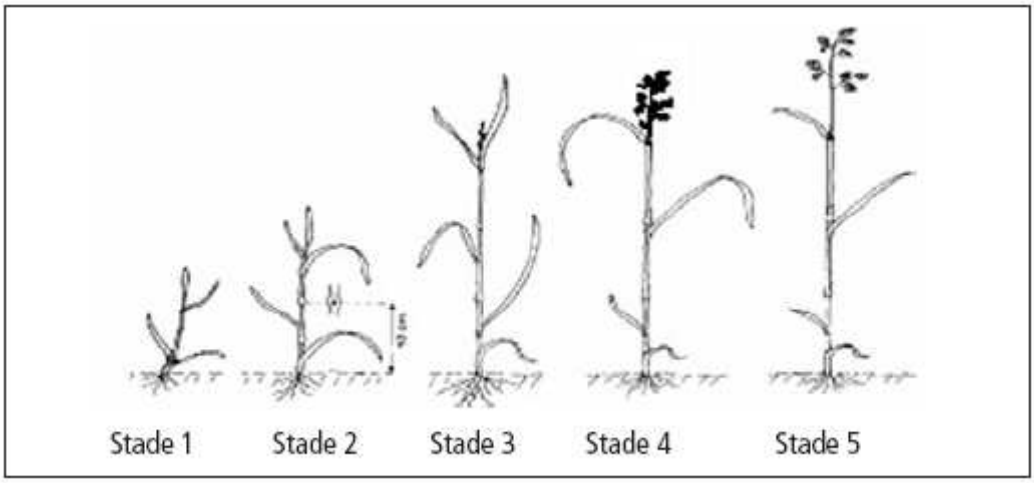

Figure 3 Stades de développement des graminées (Source: Wiss, 2007)

- Les pratiques de l'éleveur avant et durant le chantier : la fertilisation appliquée sur la prairie avant la fauche et les doses, le type de matériel (faucheuse, faneuse, presse) utilisé durant le chantier, l'organisation du chantier dans la journée ou sur plusieurs jours (date et heure de fauche, fanage presse et enrubannage), l'utilisation de mélasse et de conservateur.
- La météo avant le chantier et durant les différentes étapes du chantier.
- Les conditions de stockage de la balle : lieu, empilement des balles, couleur et état du plastique, nombre de tours de plastiques

Le questionnaire établi est basé sur un questionnaire déjà utilisé par l'ARP lors d'enquêtes précédentes sur l'ensilage. Il reprend les différents points cités précédemment pour un entretient de quelques minutes en trois parties : l'éleveur et l'exploitation enquêtée (généralités quant à l'exploitation et l'éleveur) avec le matériel utilisé, le déroulement du chantier et la description de la parcelle et des pratiques de l'éleveur quant à cette parcelle et à son chantier et enfin la description de la balle prélevée et de l'échantillon obtenu.

Les enquêtes se déroulent simultanément au prélèvement de l'échantillon.

3.3. Spectromètres utilisés

3.3.1. FOSS

Pour des raisons de délais, il est nécessaire d'obtenir des valeurs de référence autres que celles du laboratoire. Il a été décidé d'utiliser les valeurs prédites par le FOSS 6500 NIR System monochromator (FossNIRSystems, Silver Spring, MD, USA). Ce spectromètre proche infrarouge fixe possède une fenêtre spectrale allant de 400 à 2498 nm. Les prédictions sont mesurées sur la part d'échantillon broyée et séchée à l'aide d'une ring-cup. Deux ring-cup sont scannées par échantillon et le spectre moyen obtenu est utilisé pour la prédiction.

3.3.2. ASD

L'AgriSpec de l'ASD (Analytical Spectral Devices) couvre une large bande spectrale avec des lectures de longueurs d'ondes comprises entre 400 et 2498 nm et un pas de 2nm. Il est composé de plusieurs éléments : un module de lecture relié à un module de traitement par un câble optique (Figure 4). Son fonctionnement est géré par un ordinateur portable sur lequel les résultats sont lus.

Figure 4 ASD FieldSpec® 3

3.3.3. PHAZIR

Le Phazir est un appareil couvrant une bande spectrale de 900 à1690nm avec un pas de 8 nm. C'est un petit appareil portatif très maniable, composé d'un unique module. Les résultats se lisent directement sur l'écran de l'appareil (Figure 5).

Figure 5 PhazIR™ (Polychromix, USA)

3.4. Le dispositif expérimental

3.4.1. Echantillonnage

Le nombre d'échantillons nécessaire à l'élaboration d'une calibration et donc d'une base de données spectrale dépend du nombre de constituants à étudier, des sensibilités de réponse de ces constituants, de la précision de la méthode de référence etc. (CIRAD CP). Les préconisations quant au nombre d'échantillon sont d'au moins 10 par coefficient de régression, y compris l'ordonnée à l'origine. En infrarouge, le nombre de variables c'est-à-dire de longueurs d'ondes, est assez élevé. Ceci implique un nombre d'échantillon nécessaire encore plus important afin d'éviter d'obtenir des coefficients instables.

Néanmoins, on recherche en priorité une variabilité importante au sein de la base spectrale et donc au sein des échantillons prélevés plutôt qu'un grand nombre de spectres regroupés autour de la moyenne.

Un lot de 3 échantillons est prélevé dans des balles différentes issues du même chantier pour représenter la variabilité au sein d'un chantier. Le questionnaire d'enquête établit une fiche correspondant au chantier ayant permis la réalisation de chaque échantillon. Si l'éleveur possède des balles issues de différents chantiers, un lot d'échantillons est prélevé pour chaque chantier afin représenter la variabilité au sein de l'élevage.

Une attention particulière est portée à la façon dont est prélevé l'échantillon. Le protocole de prélèvement doit être identique tout au long de l'étude et reproductible. Une fois la calibration établie, lors l'utilisation future de cet outil, les mesures devront être prises sur des échantillons prélevés de la même façon que lors de la calibration.

Adesogan (2000), explique l'importance de la façon dont est prélevé l'échantillon au sein de la balle ronde : il faut éviter la surreprésentation du cœur de balle. A l'aide de l'ARP, un outil de prélèvement d'échantillons au sein des balles rondes est donc mis en place (voir annexe). Le prélèvement se fait avec une carotteuse cylindrique de 63 mm de diamètre et 600 mm de longueur. Il s'effectue perpendiculairement à la face cylindrique de la balle (Figure 6). Deux prélèvements sont effectués sur une ligne parallèle au sol et perpendiculairement l'un à l'autre. Ils sont effectués à mi hauteur de la balle. Ceci permet de récupérer la quantité nécessaire de fourrage à tous les niveaux de la balle (bords, milieu, centre) et donc d'avoir un échantillon représentatif de la variabilité de la qualité du fourrage au sein même de la balle.

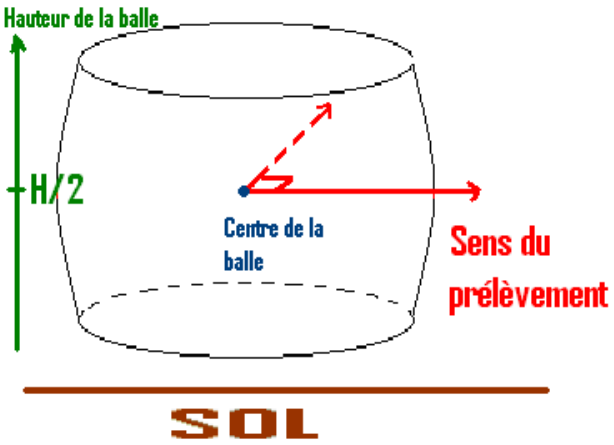

Figure 6 Sens du prélèvement au sein de la balle

3.4.2. Mesure des spectres

D'une manière générale, les spectres infrarouges de substrats naturels contiennent un nombre important d'informations présentant un grand intérêt analytique (Bertrand *et al.*, 2006). Cependant, l'extraction de ces informations n'est pas immédiate et demande un traitement mathématique complexe.

En effet, les spectres résultants d'une interaction de la matière avec la lumière, de nombreux phénomènes tels que la réflexion, le recouvrement des bandes d'absorptions ou encore la prédominance du spectre de l'eau dans le cas des ensilages entraînent l'impossibilité de modéliser théoriquement les informations. De ce fait, il faut tenir compte des variations en accumulant de nombreux spectres pour un unique échantillon (Bertrand *et al.*, 2006). Les mesures de spectres sont réalisées avec le PHAZIR et l'ASD à raison de 30 mesures par spectromètre et par échantillon afin de représenter la variabilité au sein de l'échantillon.

Dans un seau on homogénéise la matière prélevée par la carotteuse et on en étale une partie sur toute la surface du plateau. La répartition homogène des mesures à la surface de l'échantillon est assurée par une grille (Figure 7 et 8). On fait très attention à ce que l'épaisseur de matière soit assez importante pour qu'il n'y ait pas de trou lors des mesures.

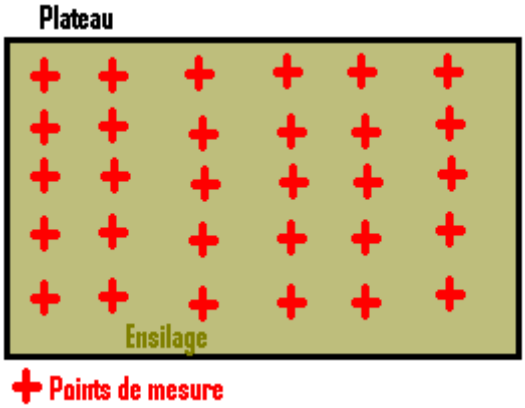

Figure 7 Répartition des points de mesure sur l'échantillon

Figure 8 Echantillon prélevé et mis en place pour la mesure des spectres (Photo : V. Barbet-Massin)

Immédiatement après la mesure, l'échantillon est compacté de manière à chasser un maximum d'air et conservé en atmosphère anaérobie dans sac plastique fermé hermétiquement dans glacière maintenue à 4°C avant traitement.

3.4.3. Analyses de laboratoire

3.4.3.1. Traitement des échantillons

Dans le cas de l'ensilage, la mesure sur du matériel frais permet d'éviter la perte d'information par évaporation des AGV, des alcools et du nitrogène volatile lors du séchage (Adesogan, 2000 ; Deaville et Flynn, 2000). Au dessus de 80°C, le séchage en étuve peut provoquer la dégradation de composés chimiques et l'apparition de produits issus de la réaction de Maillard alors qu'un séchage plus lent en dessous de 50°C entraîne la perte de matière sèche par la persistance de la respiration et des réactions enzymatiques (Smith, 1973 *in* Adesogan, 2000). Si le séchage reste nécessaire, Adesogan (2000) le recommande à 60°C dans une étuve bien ventilée. Dans ce cas, il est nécessaire d'appliquer des équations de correction sur les composés perdus ou on risque de surestimer certains composés chimiques et sous estimer la digestibilité.

Chaque échantillon prélevé est séparé en plusieurs parts.

1) Première part: **séchage et broyage** :
   - Mesure du poids en vert dans les paniers prévus à cet effet
   - Mise à l'étude à 70°C pendant 48h
   - Mesure du poids en sec => obtention de la MS, MSR = MS/100
   - Broyage de l'échantillon

   Ces échantillons en poudre sont conservés dans des flacons en plastique à température ambiante pour réaliser les analyses des composants chimiques

2) Deuxième part: **macération aqueuse** du fourrage frais au 1/5 (100mL) :
   - Peser exactement 100g d'ensilage frais. Noter PE
   - Recouvrir de 400g d'eau, noter le volume d'eau. Fermer

   a. Laisser au minimum une nuit à 4°C

   - Filtrer et récupérer le filtrat dans un flacon étanche
   - Centrifuger

     CALCUL DE V/MS: ((PE*(1-MSR)+Vol.eau))/(PE*MSR)

3) Troisième part: **macération aqueuse** du fourrage frais, acidifiée à pH<4,5 (100mL). Le même procédé est utilisé pour la macération mais quelques gouttes d'acide sulfurique H_2SO_4 sont ajoutées pour descendre le pH avant congélation. Le nombre de goutte et la concentration de l'H_2SO_4 à utiliser seront déterminés à l'aide d'un pH-mètre.

4) Quatrième part: **macération aqueuse** du fourrage frais au 1/3, stabilisée par une solution contenant des conservateurs (50 mL). Le même procédé est utilisé pour la macération mais on ajoute de l'acide phosphorique, H3PO4 ortho, (5p100 v/v) à raison de 1mL de conservateur pour 10 mL de jus.

   Ces échantillons sous forme de jus sont conservé au congélateur à -15°C.

5) Cinquième part: au moins 10 g d'**ensilage frais** congelé, destiné au dosage de l'azote total.

3.4.3.2. Analyses de laboratoire

- Mesures effectuées sur la part de l'échantillon séché

- MAT: dosage d'azote par combustion dans le LECO
- NDF, ADF, NDL: Méthode de Van Soest (1963b)
- N-NDF, N-ADF : dosage des fibres
- Cellulose: Méthode de Wendee
- dMS: Méthode d'Aufrere
- dMO: dosage de la matière organique
- Matière minérale: dosage des cendres

- Mesures effectuées sur la part de l'échantillon macérée

- pH avec pH-mètre
- Azote ammoniacal par dosage distillation BÛCHI. A effectuer sur aliquote préalablement congelé avec quelques gouttes de H_2SO_4. Méthode NH4 fumier. Titrage avec H_2SO_4 0,1N. CALCUL: ((Vol.coulé*Titre acide)*18)/PE*(V/MS)*1000 en mg NH4/kg de MS
- Azote soluble par dosage BÛCHI. Minéraliser 20mL de jus avec 20mL d'H_2SO_4. Titrage H_2SO_4 0,1N. Méthode N_TOT kjeldalh
- AGV (A. Acétique et Butyrique) (Jouany, 1981 ; Dulphy et Demarquilly, 1981 ; Demarne, 1992).
- Acide lactique par méthode enzymatique avec dosage au spectromètre U.V. (méthode Boehringer)

- Mesures effectuées sur la part d'échantillon décongelé

- Azote total: 5 g d'ensilage finement haché aux ciseaux plus 20 mL d'H_2SO_4. Noter PE. Dosage BÛCHI, titrage H_2SO_4 0,25N. Méthode N_TOT kjeldalh CALCUL: (Vol.coulé*Titre acide*14)/(PE*MSR) en g/kg de MS

4. Mesure de la qualité des ensilages à l'aide de la spectroscopie proche infrarouge

4.1. Remarque préalable

Pour des raisons de délais, la mesure de différents paramètres de qualité sur les échantillons prélevés n'a pas pu être possible. Ainsi, hormis le pH et la MS, la prédiction de paramètres de qualité de conservation tels que les acides gras volatiles, les différentes formes d'azote et les alcools ne sera pas réalisée.

4.2. Principe général

La calibration est le procédé mathématique nécessaire pour associer une mesure effectuée par la SPIR à la variable à prédire (Shenk et Westerhaus, 1996 *in* Deaville et Flynn, 2000). Elle consiste en la mise en relation des informations chimiques contenues dans le spectre avec les informations physiques ou chimiques révélées par des analyses de laboratoire. Le but est d'obtenir une équation qui permette la prédiction de valeurs des composés.

Une fois les spectres mesurés et les échantillons prélevés la calibration s'effectue en étapes :

1) Sélection basée sur les données spectrales d'un groupe de calibration dont les valeurs à prédire seront mesurées en laboratoire et au FOSS.
2) Elaboration d'équations de calibration pour chaque paramètre à mesurer à l'aide de ce groupe de calibration. Plusieurs équations peuvent être établies pour un seul paramètre
3) Validation des équations établies pour chaque paramètre à mesurer : les équations produites par le groupe de calibration sont testées par le groupe de validation et une équation, la meilleure, est conservée pour chaque paramètre.

4.3. Traitement des spectres

4.3.1. Allure des spectres prélevés

Le spectre obtenu lors de la mesure se présente comme une courbe lisse mais il s'agit en réalité de la superposition des spectres de tous les constituants du produit en question (Deaville et Flinn, 2000).

Dans les fourrages, le composé principal étant l'eau, le spectre prend une tendance semblable à celle du spectre de l'eau: deux bandes à 1940 et 1450 nm (Deaville et Flinn, 2000). Les liaisons C-H, caractéristiques des lipides, se retrouvent régulièrement à 2310, 1725, 1400 et 1210 nm alors que les liaisons O-H des sucres sont autour de 2100 et 1600 nm (Murray, 1983 *in* Deaville et Flynn, 2000). Quant aux protéines, représentées par des liaisons N-H, elles se retrouvent généralement à 2180 et 2055 nm mais ces tendances sont souvent masquées par la bande plus large des liaisons O-H (Wetzel, 1983 *in* Deaville et Flynn, 2000). L'information du spectre est contenue dans l'allure et la variation des pentes de la courbe selon les longueurs d'ondes (Murray et Williams, 1987 *in* Deaville et Flynn, 2000).

4.3.2. Traitements informatique et mathématiques des spectres

Une fois le spectre mesuré il est numérisé. En effet, un spectre d'absorbance est un signal continu. Afin de pouvoir y appliquer un traitement statistique et informatique, il est nécessaire de le transformer en une suite de nombres qui pourra être traité sur ordinateur (Bertrand et Dufour, 2006). Ceci est le premier traitement effectué sur le spectre.

La taille des particules, la dispersion lumière et la variation de la distance entre les longueurs d'onde peuvent entraîner la nécessité d'un second traitement afin d'améliorer la fiabilité de la future calibration (Deaville et Flynn, 2000 ; Bertrand et Dufour, 2006) Il s'agit de traitements mathématiques dont pour l'objectif est d'optimiser la performance des modèles de prédiction.

Dans un premier temps, il est possible d'effectuer une normalisation et une réduction des variations de l'intensité des spectres (Bertrand et Dufour 2006). Ceci est nécessaire lorsque, dans certaines situations, les spectres présentent des variations incontrôlées d'intensité générale. Le second traitement utilisé est la dérivation numérique des spectres. Son but est la réduction de la dérive de la ligne de base, l'amélioration de la résolution spectrale et la mise en exergue de l'information spectrale. Elle permet de résoudre deux problèmes de base des spectres infrarouges : le chevauchement des pics et les grandes variations de la ligne de base. Une dérivée première permet de corriger suffisamment ces deux effets. Cette dérivée est effectuée avec un gap particulier. La taille du gap (segment sur lequel la dérivée est calculée) est déterminante. Plus elle est faible (2,4) plus la sensibilité est grande et plus le bruit de fond est fort. A contrario, plus le gap est grand (>10) plus la sensibilité diminue et il y a un risque de perdre de l'information contenue dans les pics. Enfin, le degré de lissage (nombre de points pris en compte), permet la réduction de bruits aléatoires (Bertrand et Dufour 2006).

4.4. Méthode analytique

4.4.1. Construction de la population et sélection du groupe de calibration : l'analyse en composante principale

Après l'acquisition des spectres et leur traitement mathématique, l'étape suivante est l'étude exploratoire des données spectrales. En effet, la SPIR repose sur l'analyse d'une population d'échantillons bien définie pour une calibration, et sur un modèle mathématique optimal du point de vue de la précision de la calibration (CIRAD CP). La population doit être représentative de la variabilité des échantillons à prédire. Des limites et des indices de similarité entre spectres doivent être fixés pour cette population. La méthode la mieux adaptée à cette étude est l'analyse en composantes principales (Bertrand et Dufour, 2006). Elle permet d'explorer l'ensemble des spectres mesurés et donne une représentation synthétique et visuelle des données. Au final, elle permet d'obtenir des « cartes de ressemblance » dans lesquelles chaque spectre est représenté par un point sur un graphique.

L'ACP remplace les variables d'origine (absorbances) par des « variables synthétiques » (les composantes principales : CP) qui contiennent la quasi-totalité de l'information, et qui ont l'avantage d'être non corrélées ou orthogonales entre elles. Les droites et les plans d'une ACP sont réalisés avec des « combinaisons linéaires » des variables initiales (les longueurs d'onde). Les axes principaux sont les droites déterminées au fur et à mesure de façon à ce que les unités statistiques soient aussi proches que possible des axes suivant le critère des moindres carrés et que chaque droite soit orthogonale aux précédentes. Au fur et à mesure, les axes principaux sont ajoutés jusqu'à ce que l'ajout d'un nouvel axe (ou nouvelle composante principale) n'apporte pas d'information significative en terme d'explication de la variance.

Une fois l'ACP réalisée, c'est le calcul de la distance généralisée de Mahalanobis qui permet la construction de la population, en définissant les limites et les similarités entre échantillons (CIRAD CP). C'est une manière utile de déterminer la similarité dans une série de données. Elle diffère de la distance euclidienne par le fait qu'elle prend en compte la corrélation de la série de données.

Ainsi, à la différence de la distance euclidienne où toutes les composantes des vecteurs sont traitées de la même façon, la distance de Mahalanobis accorde un poids moins important aux composantes les plus bruitées. Les distances ainsi calculées sont basées sur la dispersion des données dans un espace multidimensionnel.

Les distances H sont calculées à partir de la matrice des composantes principales suivant les formules suivantes :

Matrice des distances $\mathbf{H = X(X'X)^{-1}}$

Distance Moyenne $\mathbf{Hm = 1/n\sum_i^n H_i}$

Distance standardisée $\mathbf{Hsti = Hi/Hm}$

Avec $(X'X)^{-1}$ la matrice inverse des variances covariances et X la matrice des données spectrales centrées

L'ACP permet donc dans un premier temps de juger de la représentativité des échantillons prélevés. La répartition du nuage de point dans l'espace est un indicateur de cette représentativité : plus il va être éclaté et uniformément réparti autour de l'origine, plus les individus sont différents et donc représentatifs de la variabilité des ensilages qu'il est possible d'obtenir. Plus le nuage va être resserré et excentré par rapport à l'origine, plus les échantillons vont être semblables. Cette méthode permet repérer les échantillons qui peuvent être considérés comme aberrants (outlisers, H>3) et qui, s'ils étaient conservés dans la phase de calibration, risqueraient de fausser l'équation de calibration en ajoutant une information bien trop éloignée de la moyenne.

A partir de la matrice des spectres, après l'élimination des échantillons aberrants, un sous ensemble d'échantillons représentatifs est sélectionné et analysé selon la méthode de référence (laboratoire) (Cowe and McNichol, 1985 *in* Adesogan, 2000) (Figure 7). Cette sélection s'effectue avec la distance de Mahalanobis, calculée cette fois par rapport à un échantillon et non par rapport au centre de gravité. Cela permet la définition du voisinage d'un échantillon, la similitude entre échantillons et au final la sélection des plus représentatifs. Le nombre a été fixé à 50 pour des raisons de coût.

4.4.2. Etablissement d'étalonnages prédictifs

Le dosage de constituants par la spectrométrie proche infrarouge nécessite au préalable un étalonnage de la pareil. Selon la loi de Beer-Lambert, la concentration d'un composant est proportionnelle à son absorption. Ceci est applicable aux mélanges : le modèle prédictif reliant les valeurs d'absorption et les valeurs de référence est de type multilinéaire.

$$\mathbf{y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_j x_j + \ldots + \beta_p x_p + e}$$

y est la teneur en constituant (en %),
$\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_p$ désignent les paramètres inconnus à estimer à partir des observations
x_i la mesure de l'absorption à la longueur d'onde λi (en nm).
p est le nombre de terme

Il existe plusieurs méthodes de régressions qui sont réparties en deux classes. La première méthode ne nécessite pas la compression de données.

Il s'agit de la régression linéaire multiple (MLR) en mode pas à pas. Les autres méthodes impliquent une compression de données. Il s'agit de la régression sur composantes principales (PCR) et de la régression par les moindres carrés partiels (PLS).

Pour toutes ces méthodes, le principe de calcul est le même et est fondé sur le « critère des moindres carrés », c'est à dire que l'on cherche les valeurs des coefficients du modèle qui minimisent la somme des carrés des écarts entre les n données observées (Yi) de l'échantillon de référence et les n valeurs prédites par le modèle ($\hat{Y}i$).
Le critère à rendre minimum est le suivant : $\sum_i^n (Yi - \hat{Y}i)^2$

Dans le cas de la calibration d'un spectromètre pour l'analyse de la qualité d'un fourrage, plusieurs modèles de ce type existent mais le plus fréquemment utilisé dans l'analyse de fourrages est la méthode des Partial Least Square modifiée avec validation croiée (PLS, Martens et Naes, 1989 *in* Deaville et Flynn, 2000 ; Shenk and Westerhaus, 1991 *in* Adesogan 2000). La PLS consiste en une régression de la variable à prédire y sur des variables t_i latentes. Les variables latentes sont des combinaisons linéaires de variables x_i mesurées c'est-à-dire l'absorbance mesurée pour la longueur d'onde n°i. Ceci implique un petit nombre de variables latentes et donc une interprétation plus facile et plus stable du modèle. La PLS est appliquée au premier groupe contenant les 50 spectres les plus représentatifs. Les équations obtenues sont caractérisées par les écarts-types résiduels de calibration (SEc) et par les coefficients de calibration (R^2).

Une fois le modèle obtenu, sa validation s'effectue à l'aide la "cross-validation" ou validation croisée (Deaville et Flynn, 2000 ; Bertrand et Dufour, 2006). Le groupe d'échantillons utilisé pour la calibration est divisé en plusieurs groupes et la calibration est réalisée sur chaque groupe jusqu'à ce que tous les échantillons aient été utilisés pour la calibration et la validation. Cette méthode permet de pallier les problèmes engendrés par la forte redondance entre les données spectrales : l'information contenue pour une longueur d'onde est très semblable à celle des longueurs d'ondes voisines, étant donné la petite taille de l'intervalle de mesure.

La PLS est la méthode la plus utilisée et la plus efficace dans la calibration d'appareils destinés à la mesure de constituants fourragers (Bertrand et Dufour, 2006). C'est donc cette méthode qui est utilisée pour la calibration de l'ASD et du PHAZIR.

4.4.3. Les critères de jugement d'une calibration

Lors d'une calibration, la mise en relation de la variable à prédire et des variables prédictives n'est jamais parfaite. Il existe toujours une incertitude sur la valeur prédite liée à un écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites. Il est alors important de pouvoir quantifier cet écart afin de juger de la robustesse de l'équation. Ceci est permis par les tests statistiques attachés aux différents types de régression. Ils sont issus de l'équation de l'analyse de variance pour un modèle linéaire :

$$\sum_i^n (Yi - Ymoy)^2 = \sum_i^n (\hat{Y}i - Ymoy)^2 + \sum_i^n (Yi - \hat{Y}i)^2$$

Soit **SCEt = SCEm + SECr**

Somme des carrés des écarts totaux (SCEt)
Somme des carrés des écarts du modèle (SCEm)
Somme des carrés des écarts résiduels (SCEr)
Grâce à cela son définis les carrés moyens :
Carré moyen pour la régression **CM(reg) = (SCEM/(k-1))**

Carré moyen résiduel **CM(res) = (SCER/(n-k-1))**
Carré moyen total **CM(tot) = (SCET/(n-1))**

4.4.3.1. Le coefficient de détermination

Le coefficient de détermination est la part de variance de la variable expliquée par le modèle. R^2 est compris entre 0 et 1 et plus il sera proche de 1 plus la corrélation sera grande entre x et y.

$$R^2 = SCEm / SCEt$$

4.4.3.2. Ecart type de calibration

L'estimation de l'écart type de l'erreur aléatoire entre les valeurs de référence et les valeurs prédites par le modèle est donnée par l'écart type de calibration, appelé SEC **(***Standard Error Calibration***)** :

$$SEC = \sqrt{[\Sigma(Yi - \hat{Y}i)^2 / (n-k-1)]} = \sqrt{CM(res)}$$

n est le nombre d'échantillons d'étalonnage
Yi la valeur de référence observée (à prédire)
$\hat{Y}i$ la valeur prédite pour l'échantillon i
k le nombre de variables prédictives incluses dans le modèle

4.4.3.3. Ecart type de prédiction

L'écart type de prédiction SEP **(***Standard Error Prediction***)** est l'écart type des résidus aux différences entre les valeurs prédites et les valeurs de référence. Il est calculé sur un jeu de N échantillons n'ayant pas participé à l'élaboration de l'équation de calibration:

$$SEP = \sqrt{[\Sigma(Yi - \hat{Y}i)^2/N]}$$

SEP peut servir à détecter un sur-ajustement du modèle (trop de termes). Cela peut apporter un « bruit de fond » aux spectres qu'il convient d'atténuer.

$SEP \geq SEL$
SEL est l'écart type de la méthode de référence

4.4.3.4. Ecart type de cross validation

SECV (*Standard Error of cross validation*) est une approximation de SEP et permet de déterminer le nombre moyen de termes « idéal » à prendre en compte. Ce critère est utilisé en méthodes PLS. Le calcul est fait de la manière suivante : l'échantillon est partagé en n sous groupe et le modèle est développé à partir de n-1 sous-groupe, le modèle est appliqué sur le groupe restant et produit une SEP. Cette opération est reproduite n fois avec un échantillonnage différent et est dite de cross validation. Ainsi, quatre équations sont générées pour un facteur et pour chaque constituant. La SECV pour chaque constituant est calculée à partir des quatre SEP. L'exercice est répété pour des modèles contenant 2, 3, 4, 5…n facteurs. Le modèle retenu est celui ayant la SECV la plus petite. La SECV est une estimation plus exacte de l'erreur de calibration que la SEC.

$$SECV = \sqrt{[\Sigma(Yi - \hat{Y}i)^2/n-1]}$$

En comparant la SEC et la SECV, on évalue la robustesse du modèle, c'est-à-dire la capacité à prédire les paramètres étudiés quelque soit la variabilité de la collection de référence. Un modèle « robuste » a une SECV proche de la SEC.
Pour avoir plus de précision concernant la qualité des modèles de régression linéaire, un ratio performance/déviation (RPD) est pris en considération. Le RPD est le rapport entre la variabilité (écart type) et la précision de calibration (SECV) : on peut donc avoir un RPDcv et RPDp. Ce rapport est une indication de l'information apportée par le modèle. On considère souvent qu'un modèle est intéressant à partir d'un RPD=3-4 et très bon au-delà de 6 (Tableau 5).

Tableau 4 Valeurs de RPD et qualité d'une calibration (Williams, 1987)

RPD	Qualité	Application
<1.0	Très pauvre	Non recommandée
1.0-2.4	Pauvre	Non recommandée
2.5-2.9	Juste	Tests bruts
3.0-3.9	Raisonnable	Tests
4.0-5.9	Bonne	Contrôle qualité
6.0-7.9	Très bonne	Assurance qualité
8.0-10.00	Excellente	Toutes applications
>10.00	Supérieure	Aussi bien que référence

4.5. Résultats

4.5.1. Calibrations effectuées

Pour des raisons de délais, nous nous sommes focalisés sur la calibration de l'ASD, le PHAZIR n'ayant pas encore pu être calibré. De plus, les valeurs de laboratoire n'ayant pas pu être obtenues à cause du grand nombre d'échantillons à analyser, les calibrations n'ont été réalisées qu'avec les valeurs de références obtenues grâce au FOSS après broyage des échantillons.

4.5.2. Etapes successives pour la calibration du FOSS

L'acquisition des spectres est réalisée selon le logarithme décimal de l'inverse de l'énergie de réflectance (log 1/R). Le traitement est réalisé en utilisant les logiciels ASD to NIR (Juanes et Dardenne, 2010) et WinISI 4 (Shenk and Westerhaus, 1993).

1) Elimination des spectres aberrants et outliers

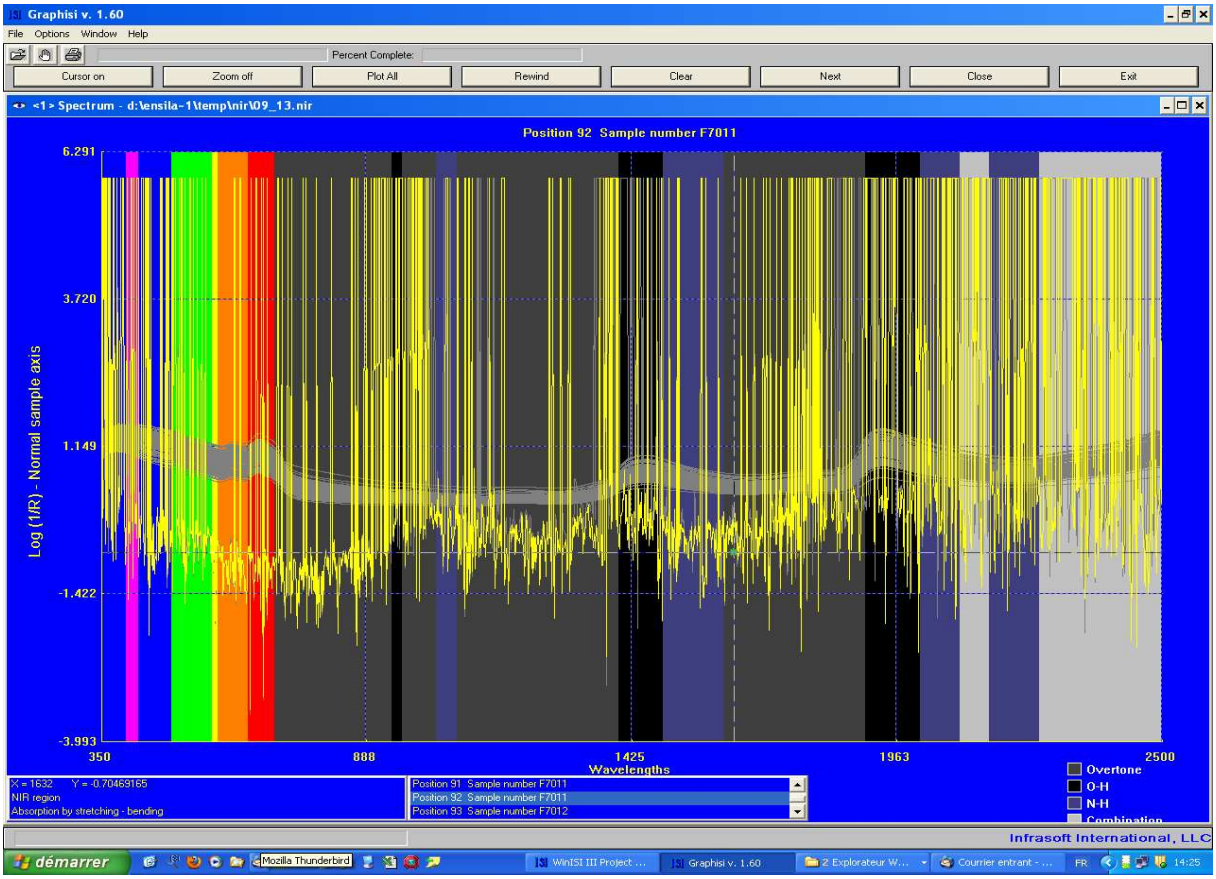

Figure 9 Exemples de spectres aberrants

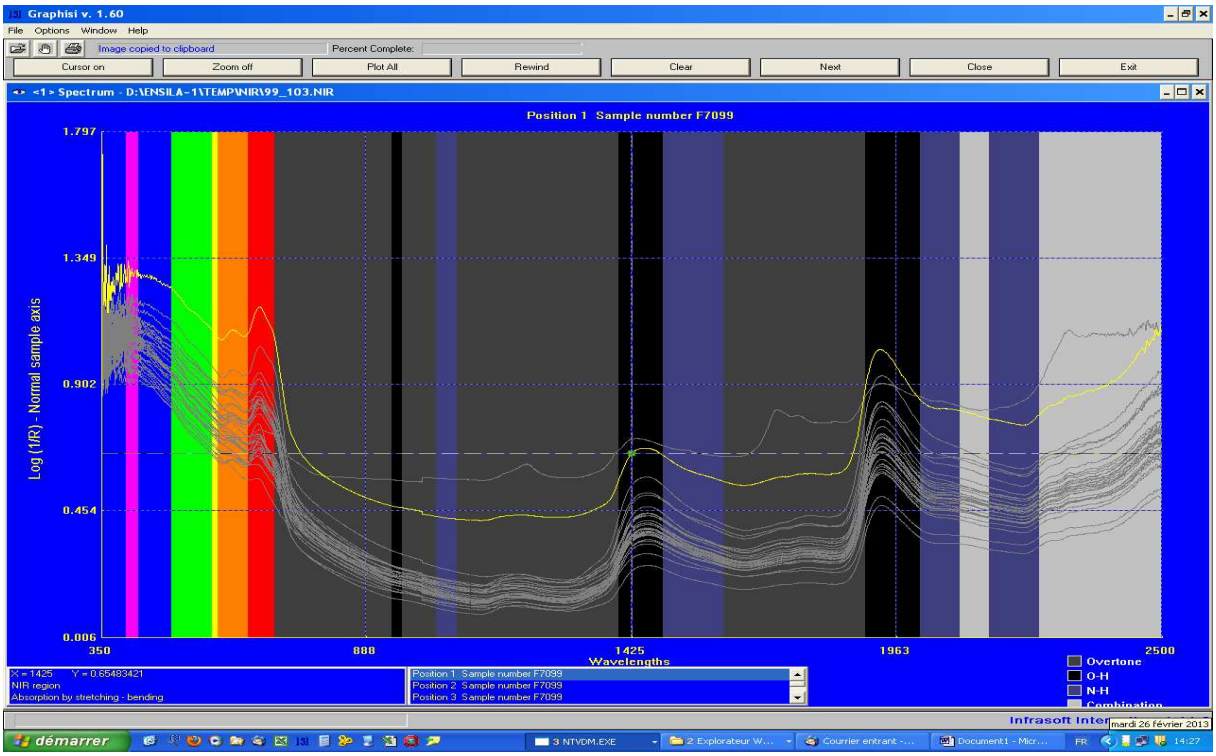

Figure 10 Exemples de spectres outliers

Les spectres aberrants sont issus des mauvaises manipulations de l'appareil lors de l'acquisition des spectres.
Les outliers peuvent être expliqués par la présence de débris de bois mort ou autres rencontrés lors des prélèvements.
Il est important de supprimer ces deux types de spectres afin de ne pas fausser la calibration.

2) Moyenne de tous les bons spectres obtenus ainsi que suppression de la partie visible des spectres

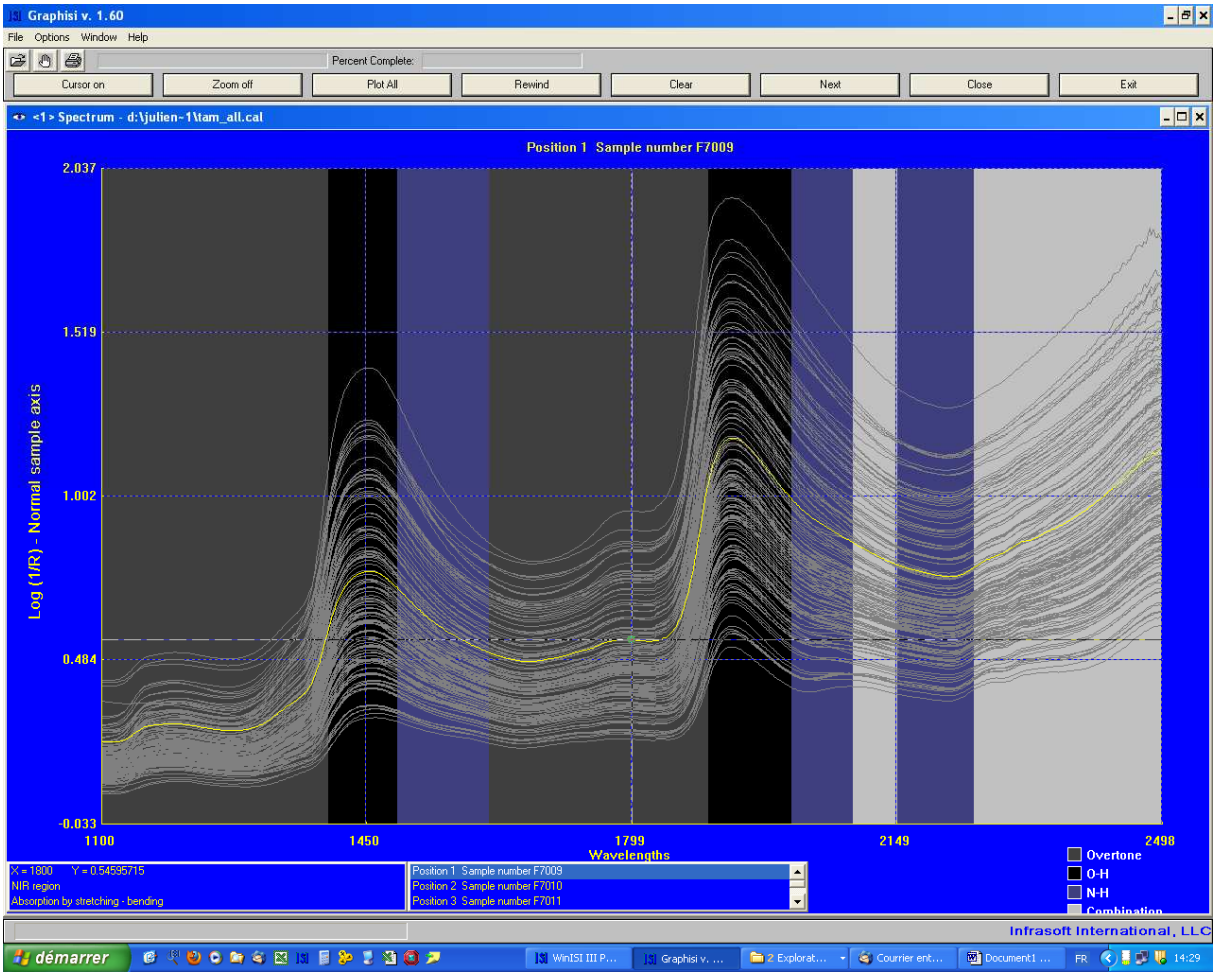

Figure 11 Moyenne de l'ensemble des spectres trimés

La figure 11 montre l'ensemble des spectres corrects moyennés. Une moyenne des 30 spectres par échantillon est réalisée. Il ne reste donc plus qu'un spectre par échantillon soit 138 spectres qui représentent la diversité du prélèvement.
Seule la partie invisible a été retenue (1100 nm-2498nm) car le reste présente un fort « bruit » ce qui la rend imprécise. Cette zone est donc supprimée de l'analyse afin de ne pas fausser la calibration.
Cette suppression s'appelle un « trim ».

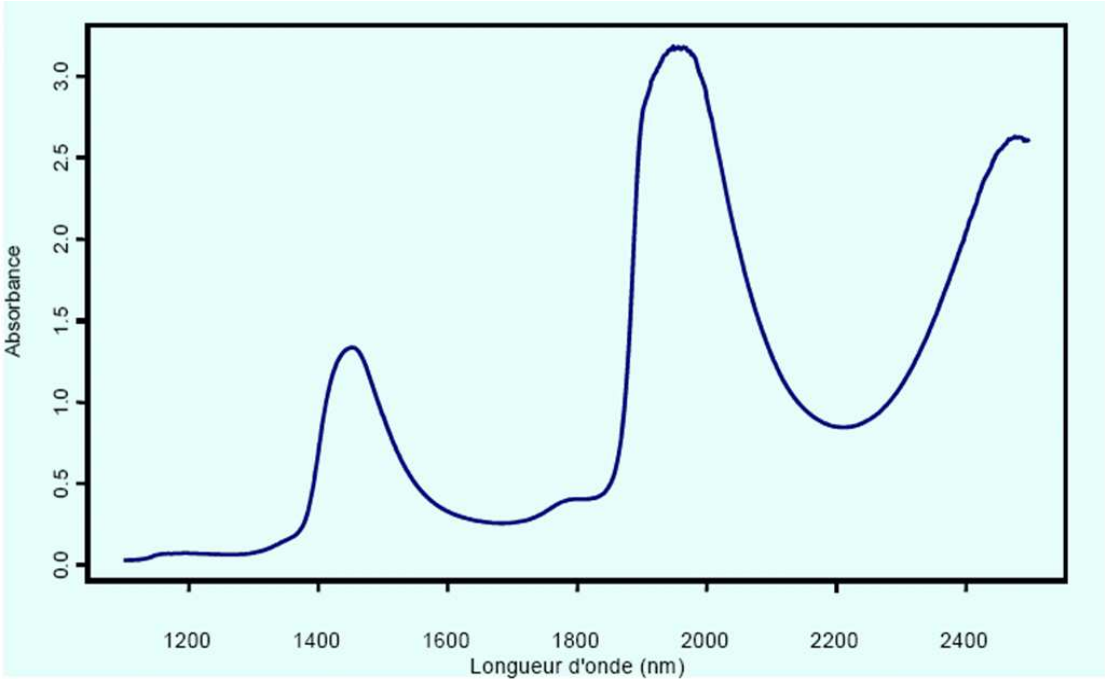

Figure 12 Spectre de l'eau dans le proche infrarouge

Les spectres obtenus présentent de fortes ressemblances (figure 8). Ils se superposent selon les différentes valeurs d'absorbances des constituants. On observe une forte densité optique et des pics d'absorptions principalement au niveau de 2 longueurs d'ondes : 1450 nm et 1940 nm. Ces bandes spectrales sont caractéristiques de l'absorbance de l'eau (Figure 9)

3) Réalisation d'une ACP

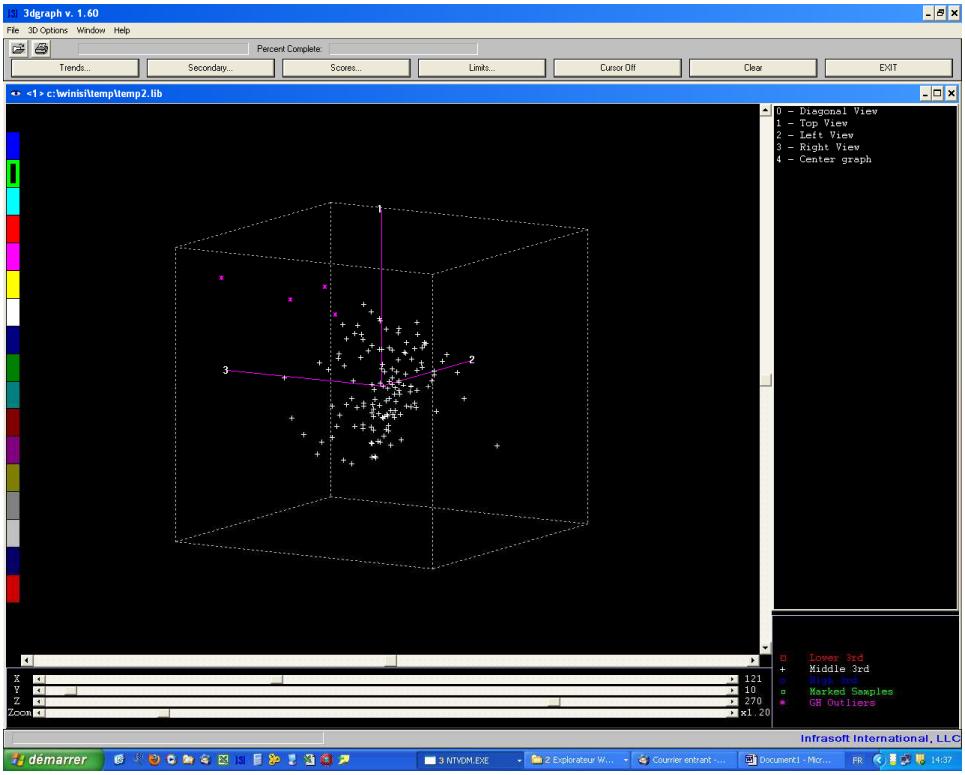

Figure 13 Réalisation d'une ACP avec l'ensemble des spectres

A l'aide du logiciel Winisi III, une ACP a été réalisée sur les 209 spectres acquis. Un nuage de points se dessine autour des 3 composantes principales du graphique 3D (Figure 11). Les spectres dont des distances GH sont supérieures à 3 sont considérés comme des outliers de compositions. Ils sont au nombre de 5 et ont été supprimés avant la calibration. Sur la figure 13, on voit bien les points qui sont excentrés, ce sont les outliers, L'anormalité de ces spectres peut-être expliquée par la présence de résidus de fumier ou de compost au sein de l'ensilage, dont la présence avait été observée lors des prélèvements.

3) Traitement mathématique des spectres

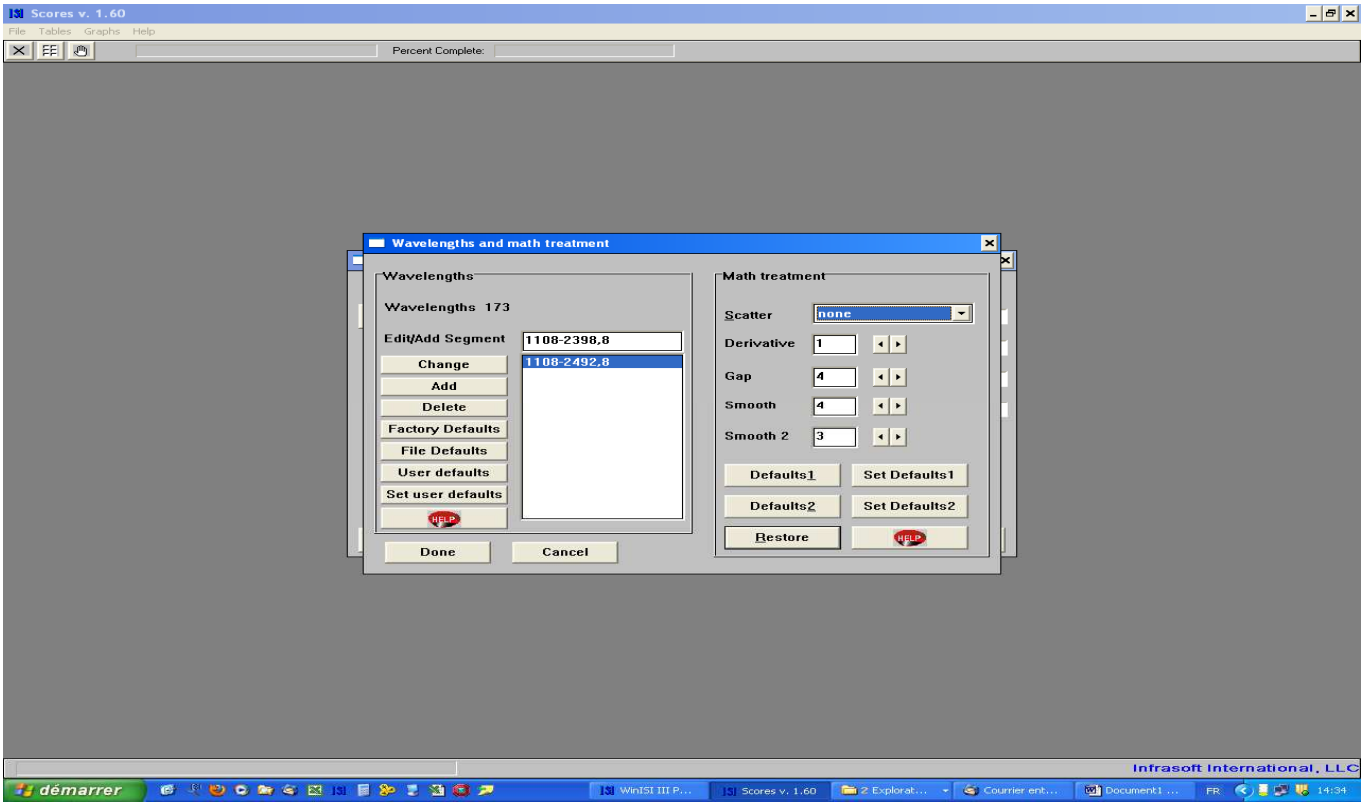

Figure 14 traitements mathématiques retenus par tâtonnement

Les traitements mathématiques retenus dans cette étude sont une dérivée première, un gap de 4, un lissage de 4 et un second lissage de 3.
Ces traitements s'effectuent par tâtonnement jusqu'à l'obtention de spectres parfaits.

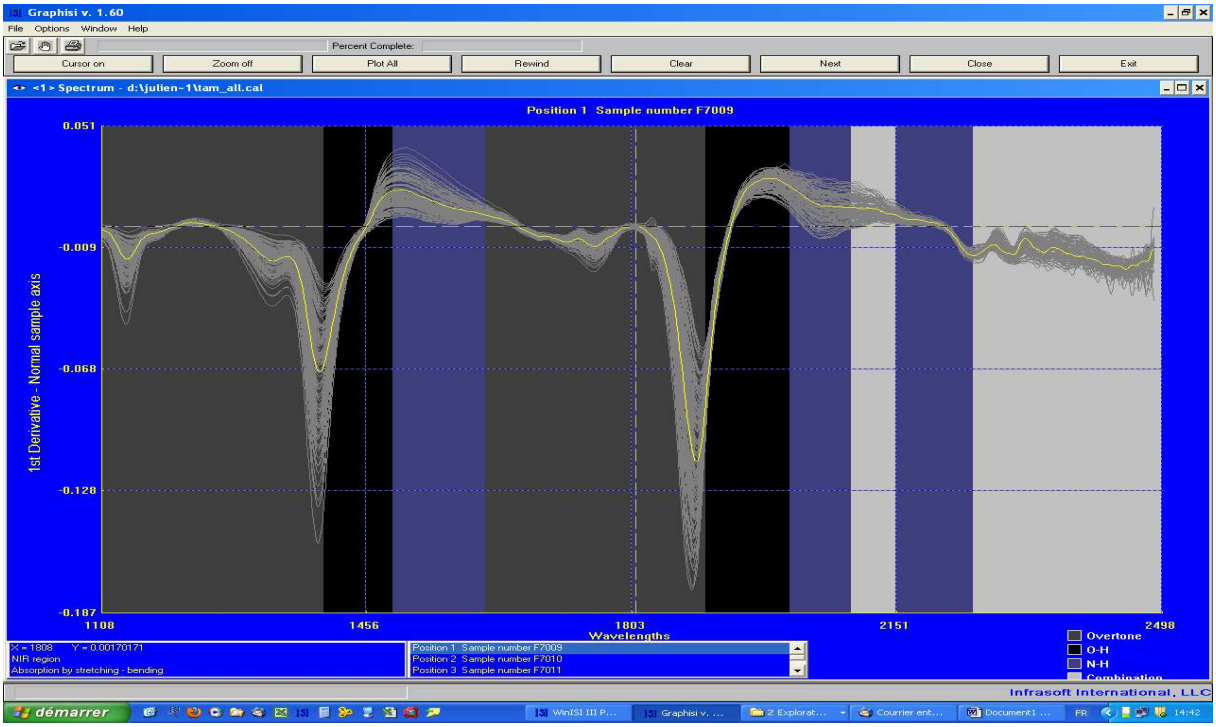

Figure 15 Spectres après les traitements mathématiques

4.5.3. Calibration avec les valeurs prédites par le FOSS

Cette calibration est effectuée avec la prédiction par le FOSS de la valeur alimentaire de tous les échantillons prélevés, aucune sélection n'étant nécessaire puisque hormis le coût de l'appareil, les analyses sont gratuites à l'instar des analyses de laboratoire. La totalité des 138 échantillons seront donc calibrés avec le FOSS.
Toutes les bandes spectrales de tous les échantillons (de 1100 à 2498 nm) vont être confrontés à leur valeur alimentaire données par le FOSS.

File View v1.60

File Reference Values Functions Graphics Entry Level Window Help

Edit - D:\JULIEN~1\TAM_ALL.CAL

File Name: D:\JULIEN~1\TAM_ALL.CAL Spectra and Constituent Data File File Date: Tue Feb 26 09:43:50 2013 Last Update: Tue Feb 26 10:41:20 2013 File ID: asd 2 ISI

Master No: <none> Instrument Model: NIRSystem 5000 Serial No: 00000000 Samples: 138 Deleted: 0 Constituents: 8

No. Data Points: 700 Lab Basis Dry Matter

Segment 1 1100 - 2498, 2

Position	Sample Number	ADF	DMSauf	ADL	PROTEIN	NDF	ASH	CELL	Msetuv	1100.00	1102.00	1104.00	1106.00	1108.00	1110.00
1	F7009	26.1292	72.1678	2.6445	15.8782	44.7374	11.7821	22.9699	33.4000	0.2242	0.2239	0.2238	0.2237	0.2236	0.2235
2	F7010	26.8361	69.4115	2.7159	15.8750	44.2203	10.6027	23.7830	35.1800	0.2276	0.2274	0.2272	0.2269	0.2268	0.2266
3	F7011	28.6195	65.9771	3.3831	13.4251	50.4633	13.0625	26.4988	38.8900	0.1516	0.1515	0.1513	0.1512	0.1512	0.1511
4	F7012	35.8705	57.1880	3.3673	11.4034	56.5382	11.6734	31.0777	28.9700	0.2007	0.2007	0.2008	0.2011	0.2011	0.2012
5	F7013	35.5372	56.0185	3.5853	11.6348	59.7092	10.7705	31.3137	30.5300	0.1557	0.1560	0.1560	0.1563	0.1564	0.1567
6	F7014	34.2302	56.7300	3.6117	11.3610	58.4121	13.5134	30.8779	32.4400	0.1444	0.1447	0.1447	0.1450	0.1452	0.1455
7	F7015	33.9055	57.7823	3.3076	10.3640	58.6953	12.6792	30.5313	36.9400	0.1606	0.1609	0.1608	0.1610	0.1612	0.1613
8	F7016	36.3958	54.3861	3.1943	13.2469	60.5441	12.1322	33.3103	22.3100	0.1262	0.1264	0.1267	0.1270	0.1273	0.1277
9	F7017	40.9322	44.4285	4.2152	12.2764	64.4079	11.6019	37.6439	42.1300	0.1201	0.1204	0.1209	0.1212	0.1217	0.1222
10	F7018	33.3592	61.6661	3.6613	16.7902	55.6596	11.6110	29.6441	69.0800	0.1248	0.1247	0.1248	0.1247	0.1247	0.1248
11	F7019	39.1975	46.0995	4.4779	10.2707	65.7781	10.4506	36.1934	71.0300	0.1462	0.1461	0.1461	0.1459	0.1461	0.1460
12	F7020	45.2021	33.3482	5.3783	8.6959	71.0888	9.9768	40.7642	55.0800	0.0888	0.0888	0.0890	0.0891	0.0893	0.0895
13	F7021	33.7899	58.7917	4.7550	14.5300	56.0014	10.6327	29.4801	63.1900	0.1459	0.1457	0.1456	0.1457	0.1457	0.1457
14	F7022	24.1304	82.3834	3.6582	13.1904	45.3340	8.5928	22.1428	74.2900	0.0922	0.0922	0.0921	0.0921	0.0921	0.0920
15	F7023	23.8665	81.2635	3.0823	13.7721	46.0401	9.1117	23.0267	63.6400	0.1195	0.1195	0.1193	0.1193	0.1193	0.1191
16	F7024	29.1957	73.4948	3.0678	18.0871	48.3643	10.9833	25.4940	51.4200	0.1585	0.1584	0.1583	0.1582	0.1582	0.1580
17	F7025	28.2318	73.5345	2.6943	18.1187	47.4750	10.5153	25.0537	50.0000	0.1578	0.1576	0.1574	0.1572	0.1570	0.1567
18	F7026	27.5948	76.0543	3.0423	19.1104	46.2497	10.4077	23.5183	46.2400	0.1787	0.1785	0.1782	0.1779	0.1776	0.1772
19	F7027	30.4729	67.3302	3.3577	16.8472	51.1388	9.2139	27.6304	41.8700	0.1732	0.1731	0.1730	0.1728	0.1728	0.1727
20	F7028	34.3252	53.7519	4.4791	9.1623	58.8208	8.5022	31.4728	50.4900	0.1293	0.1294	0.1297	0.1297	0.1297	0.1301
21	F7029	37.4323	50.2695	4.1144	14.0402	55.4479	11.3661	32.6931	26.4700	0.2194	0.2197	0.2203	0.2206	0.2209	0.2216
22	F7030	39.4451	39.5366	4.9909	8.5430	63.4203	12.2795	36.6695	25.4500	0.4118	0.4118	0.4120	0.4119	0.4117	0.4120
23	F7031	36.4097	53.6167	3.9753	12.0866	57.6136	10.4029	32.9689	32.8200	0.1983	0.1985	0.1989	0.1991	0.1993	0.1998
24	F7032	27.7903	77.5542	3.9985	14.9066	51.9009	8.8151	25.3459	76.8000	0.0658	0.0655	0.0654	0.0654	0.0653	0.0652
25	F7033	20.8869	85.9406	2.4938	12.5464	40.9864	10.4056	19.7801	48.5400	0.1369	0.1372	0.1375	0.1377	0.1379	0.1384
26	F7034	23.1827	84.2981	2.3103	14.2120	43.8075	9.6148	22.2696	54.6500	0.1414	0.1416	0.1418	0.1419	0.1421	0.1425
27	F7035	31.7890	64.8597	2.8969	14.7239	52.2499	11.7275	28.9547	50.0000	0.1304	0.1304	0.1303	0.1301	0.1300	0.1300
28	F7036	31.3675	65.0513	2.5804	15.3791	51.9296	10.2390	28.7498	28.1900	0.1432	0.1435	0.1437	0.1437	0.1439	0.1442
29	F7037	32.1965	64.1307	2.5794	15.5352	52.7908	10.2712	29.5631	41.3000	0.1568	0.1568	0.1569	0.1569	0.1570	0.1572
30	F7038	29.4279	70.6287	3.4714	16.9779	50.8345	9.3651	26.7394	42.1200	0.1433	0.1432	0.1431	0.1428	0.1427	0.1426
31	F7039	24.0303	82.0242	2.1365	19.3605	39.7106	9.8659	21.9475	35.5500	0.1425	0.1427	0.1429	0.1430	0.1432	0.1435
32	F7040	24.4466	81.9570	1.9302	14.8606	42.9064	10.0081	22.9656	42.0500	0.1295	0.1297	0.1300	0.1300	0.1302	0.1305
33	F7041	37.0188	55.3892	3.8632	13.7730	58.3804	12.0750	31.5842	26.5600	0.1623	0.1623	0.1624	0.1627	0.1628	0.1630
34	F7042	27.6861	71.1418	3.3134	14.2021	50.0039	11.1721	26.3482	46.1000	0.1693	0.1692	0.1691	0.1691	0.1690	0.1690
35	F7043	28.0777	73.3566	2.9350	15.8329	49.7759	10.6874	26.1145	42.2400	0.1508	0.1509	0.1512	0.1513	0.1515	0.1518
36	F7044	25.6658	73.4560	3.2204	16.6450	49.0986	8.0197	24.7917	53.9000	0.1185	0.1182	0.1179	0.1176	0.1172	0.1170
37	F7045	25.4769	70.4901	3.3398	16.9251	49.4896	8.1550	24.7610	47.4600	0.1057	0.1054	0.1051	0.1049	0.1045	0.1044
38	F7046	31.1734	67.8825	3.0232	17.7060	49.1138	11.2763	27.7601	27.6500	0.1797	0.1798	0.1798	0.1800	0.1800	0.1802
39	F7047	32.5667	69.8053	4.2481	20.8611	45.2994	11.4189	26.4440	22.3700	0.1770	0.1775	0.1779	0.1784	0.1789	0.1795
40	F7048	37.1145	46.5744	4.1942	8.1425	63.9228	9.5541	33.3173	78.7900	0.1254	0.1251	0.1249	0.1246	0.1242	0.1241
41	F7049	33.6411	52.0317	4.2654	14.3940	57.9287	10.0268	31.4944	47.6800	0.1519	0.1514	0.1511	0.1508	0.1503	0.1501
42	F7050	37.9464	46.2325	4.2644	10.2880	64.6823	9.2964	33.4907	67.3800	0.1264	0.1260	0.1258	0.1256	0.1252	0.1251
43	F7051	29.0075	70.2468	2.1937	15.5619	49.2816	9.7875	27.7626	28.7000	0.0876	0.0879	0.0884	0.0888	0.0891	0.0897
44	F7052	31.1139	67.0120	3.2104	16.9524	49.7870	11.3834	27.3820	50.0000	0.1778	0.1773	0.1770	0.1768	0.1763	0.1762

Choose display options

Infrasoft International, LLC.

démarrer WinISI III P... File View v1... 2 Explorat... Courrier ent... Document1 ... FR 14:38

Figure 16 Confrontation de tous les échantillons à leur valeur alimentaire

4.5.3.1. Résultats de la calibration réalisée avec le FOSS pour l'ASD

Tableau 5 Statistiques descriptives de la calibration établie pour l'ASD avec les prédictions FOSS comme analyses de référence

Constituant	N	Moyenne	Ecart type	Min	Max	SEC	SECV	SECV-SEC	R^2	SECV/Moyenne	RPDcv
PROTEIN	125	12,79	3,01	3,56	22,03	0,75	1,08	0,33	0,88	8,44	2,79
NDF	125	58,03	7,67	35,06	81,03	1,87	2,46	0,59	0,9	4,24	3,12
ADF	126	34,63	5,73	17,45	51,81	1,3	1,63	0,33	0,92	4,71	3,52
ADL	126	3,96	0,96	1,07	6,85	0,36	0,44	0,08	0,8	11,11	2,18
CELL	124	31,22	4,78	16,88	45,56	1,05	1,35	0,3	0,92	4,32	3,54
DMS	122	57,41	13,23	17,7	97,12	2,65	3,48	0,83	0,93	3,06	3,80
Msetuv	123	43,19	16,51	0	92,71	2,75	3,38	0,63	0,96	7,83	4,88
ASH	129	10,43	1,6	5,65	15,21	0,86	1,18	0,32	0,45	11,31	1,36

Pour chaque paramètre, le nombre d'échantillon (N) utilisé pour construire le modèle est inférieur à celui de la collection de référence (Tableau 6). Les échantillons qui ont des valeurs prédites trop différentes des valeurs de références n'ont pas été pris en compte dans la calibration car ils détériorent fortement la qualité de la régression. Ce sont les outliers de prédictions.

On peut noter que quelque soit le groupe de calibration, l'écart entre les valeurs minimales et maximales prises par les valeurs de référence est important ainsi que l'écart type. Ceci montre donc une grande variabilité dans les valeurs disponibles pour la calibration des appareils pour chaque constituant. Cette variabilité était attendue puisque recherchée lors de la composition de la population.

- ***Protéines***

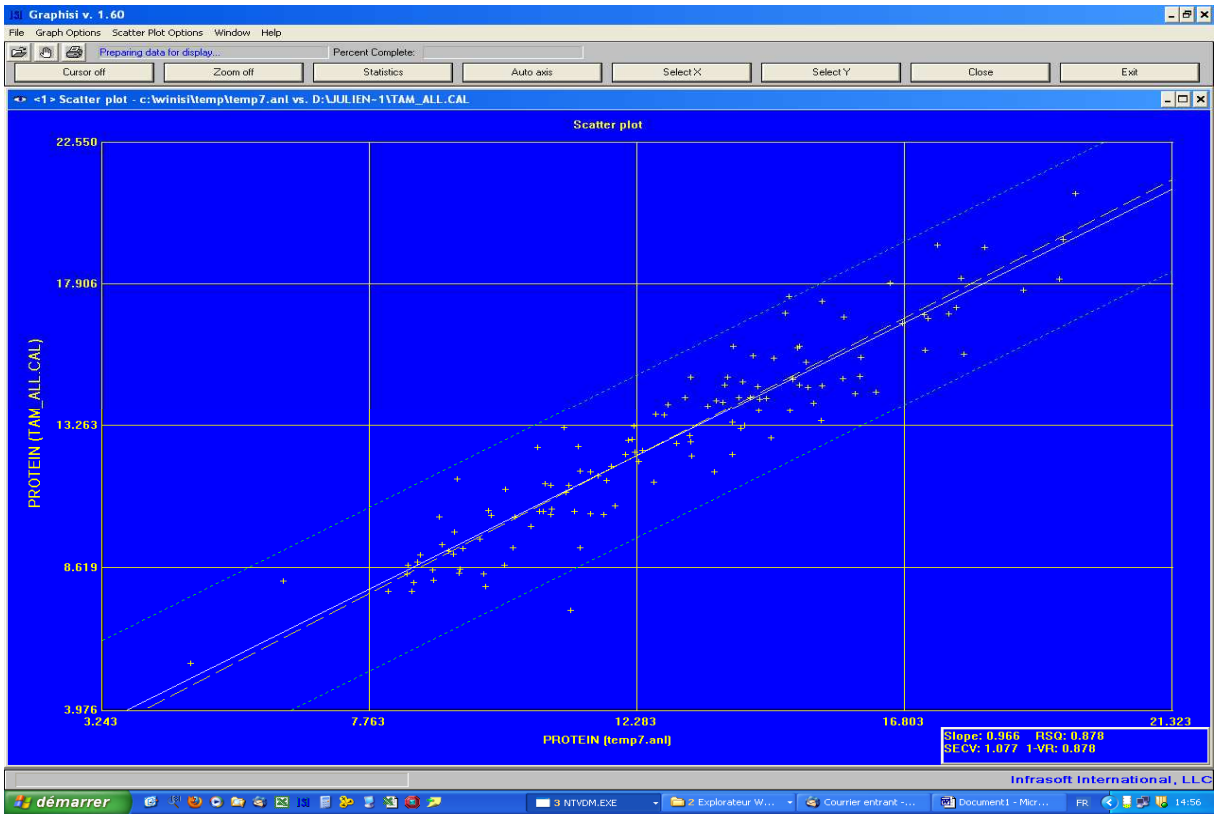

Figure 17 Equation de calibration retenue pour les protéines

Le taux de protéines brutes a fait l'objet de nombreux travaux de recherche en SPIR. Les résultats obtenus sur l'ensilage sont proches de la bibliographie pour les calibrations de l'ASD. D'après la figure 16, la calibration est de bonne qualité pour l'ASD. On voit bien que les points sont assez bien regroupés autour de la droite. A la vue du tableau 6, le RPDcv est de 2.79 et le pourcentage d'erreur type de la validation croisée de 8.44% ce qui est très acceptable. Les protéines sont également bien corrélées avec un R^2 de 0.88 et les valeurs de SEC et de SECV sont proches. La calibration de l'ASD pour les protéines est donc très correcte.

- ***Cendres***

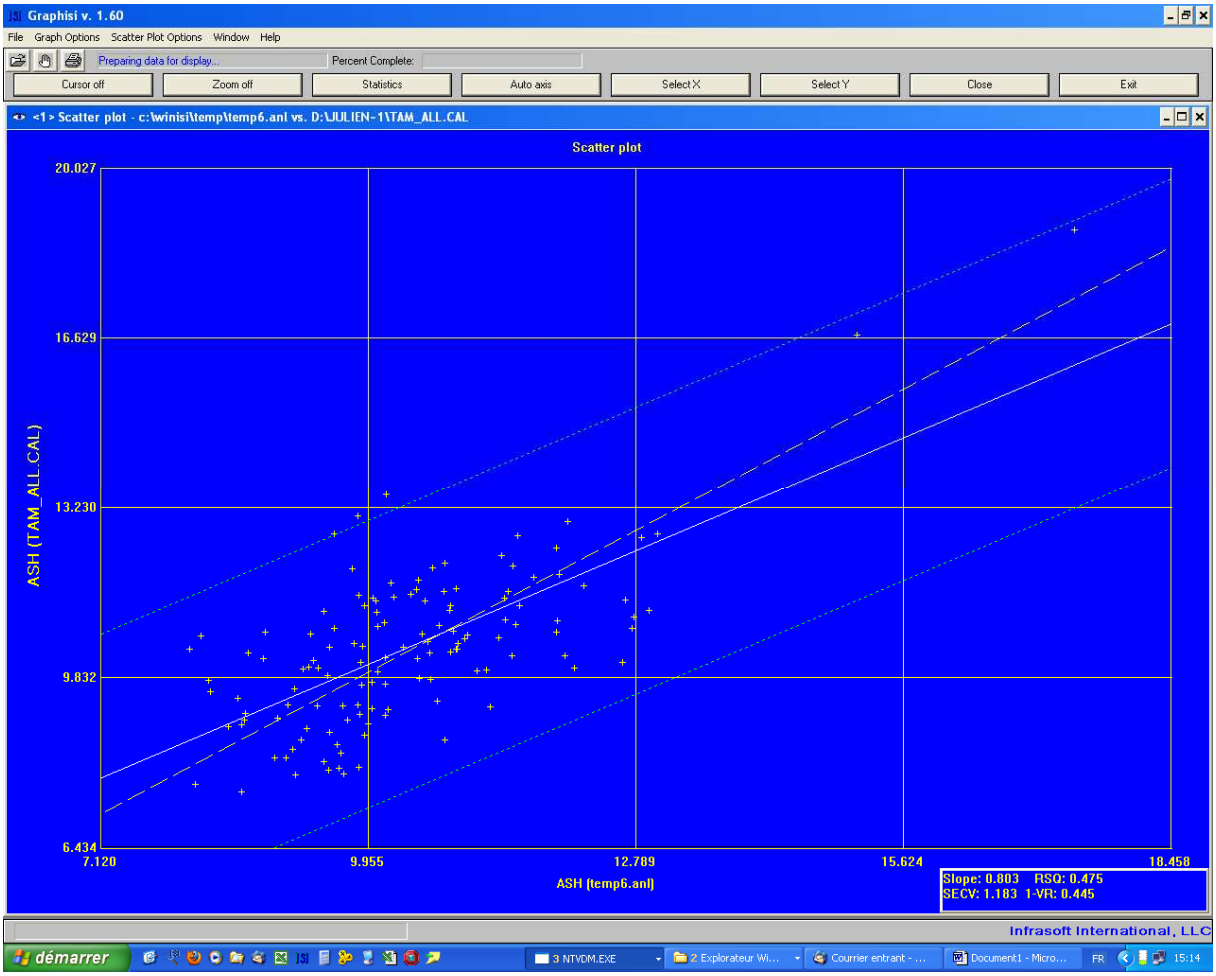

Figure 18 Equation de calibration retenue pour les cendres

On voit tout de suite que les points sont assez dispersés. A la seule vue du graphe, on peut tout de suite affirmer que la calibration ne sera pas si bonne pour les cendres (ASH).
D'après les résultats (tableau 6), les modèles de calibration obtenues ne permettent pas de prédire les teneurs en cendres de manière extrêmement fiable avec l'ASD.
Le R^2 n'est que de 0.45 ce qui veut dire que les valeurs sont mal corrélées entre elles. De plus le RPDcv est de 1.36. Ces deux valeurs sont les plus faibles de toutes les autres prédictions. Les erreurs par rapport à la moyenne sont également les moins bonnes de toutes les prédictions avec 11.31 %, malgré que les valeurs de SEC et de SECV soient assez proches.
Comme il a été vu précédemment, la prédiction des composés minéraux par la SPIR est théoriquement très difficile car il y a un manque d'absorption dans la région proche infrarouge. De plus l'eau contenue dans les échantillons a tendance à diluer les cendres et donc à les rendre difficilement décelable par l'ASD. Ce résultat concernant les cendres était donc attendu.

- ***Fibres***

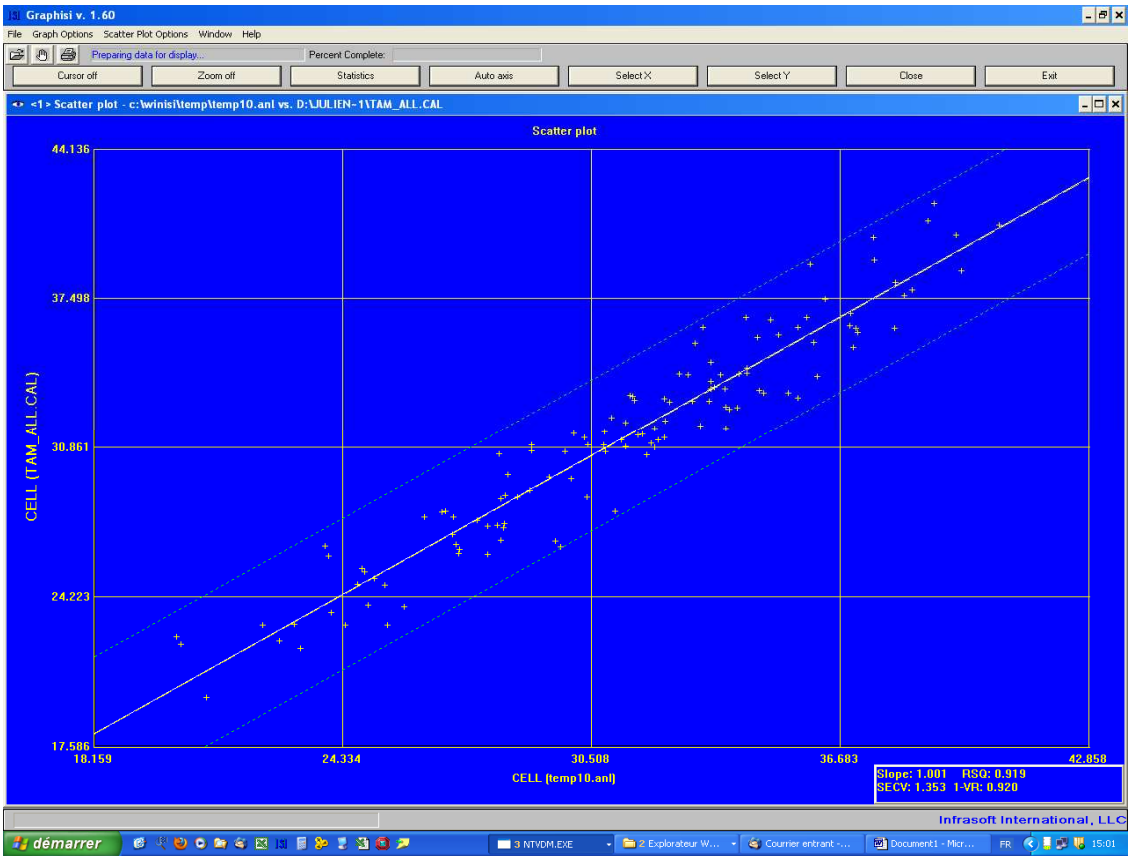

Figure 19 Equation de calibration retenue pour la cellulose

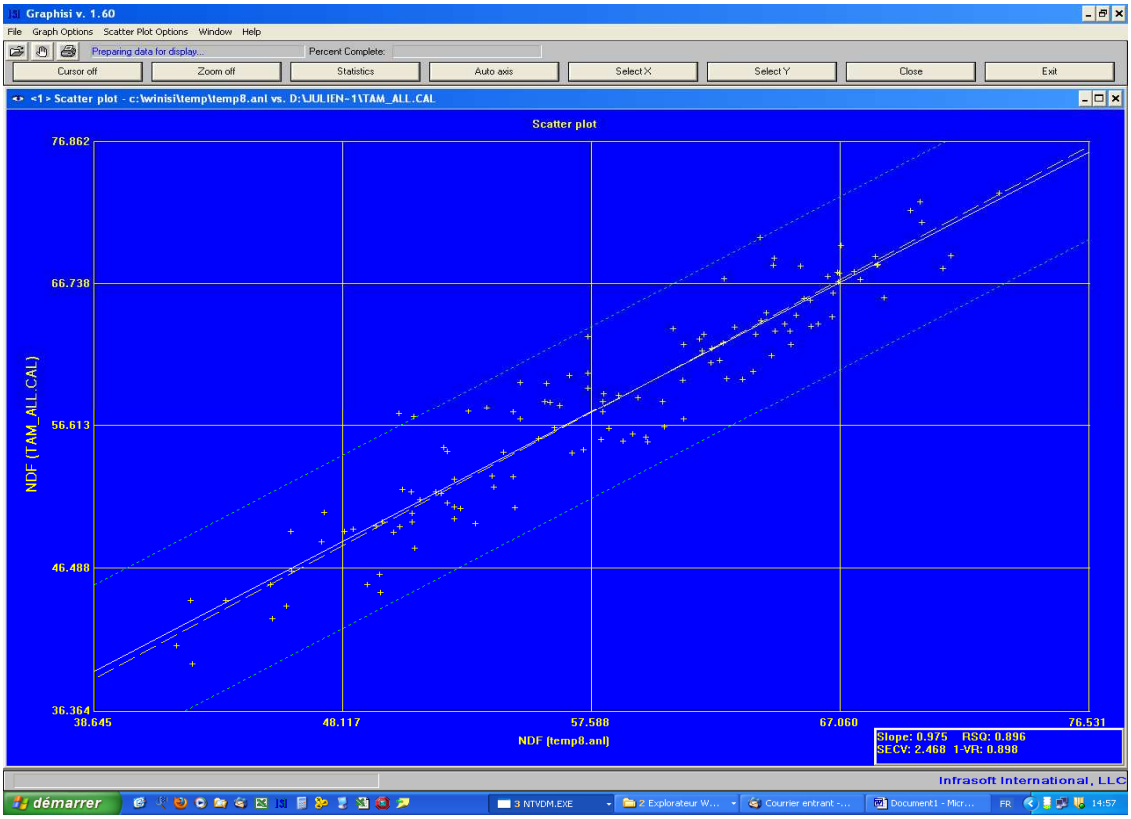

Figure 20 Equation de calibration retenue pour le Nuetral Detergent Fiber (NDF)

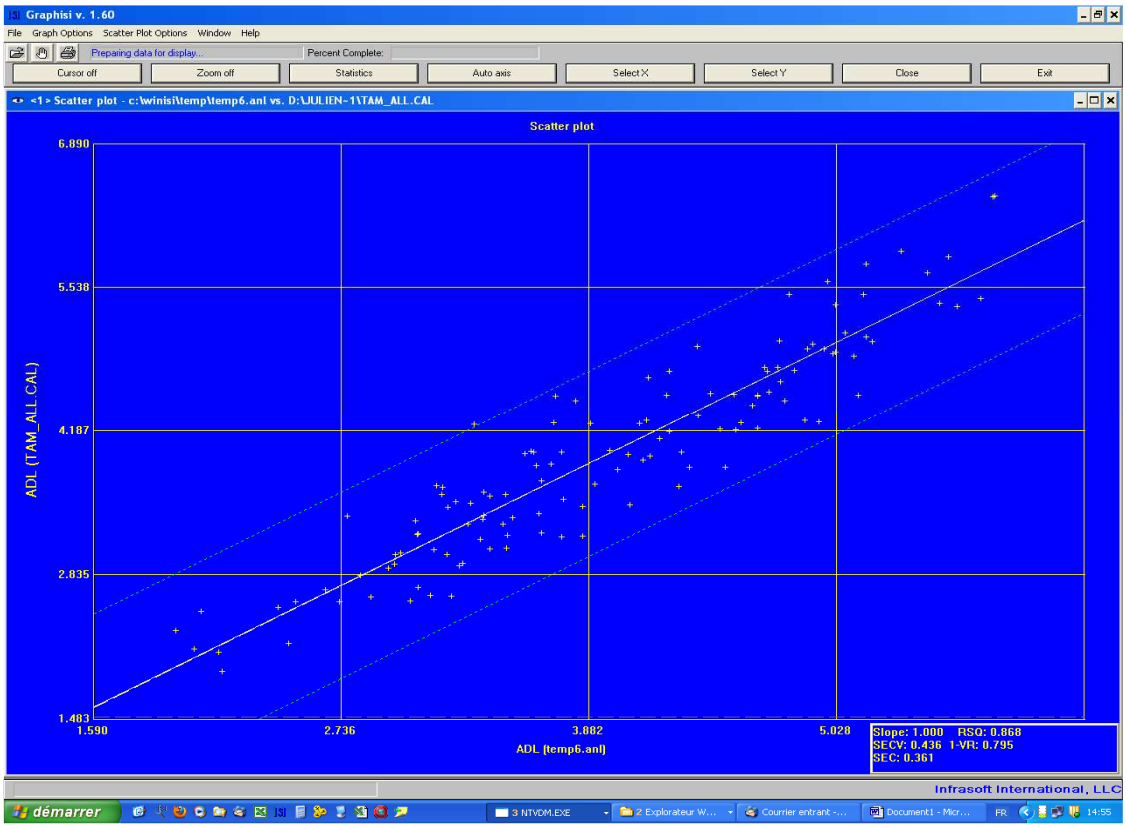

Figure 21 Equation de calibration retenue pour l'Acid Detergent Lignin (ADL)

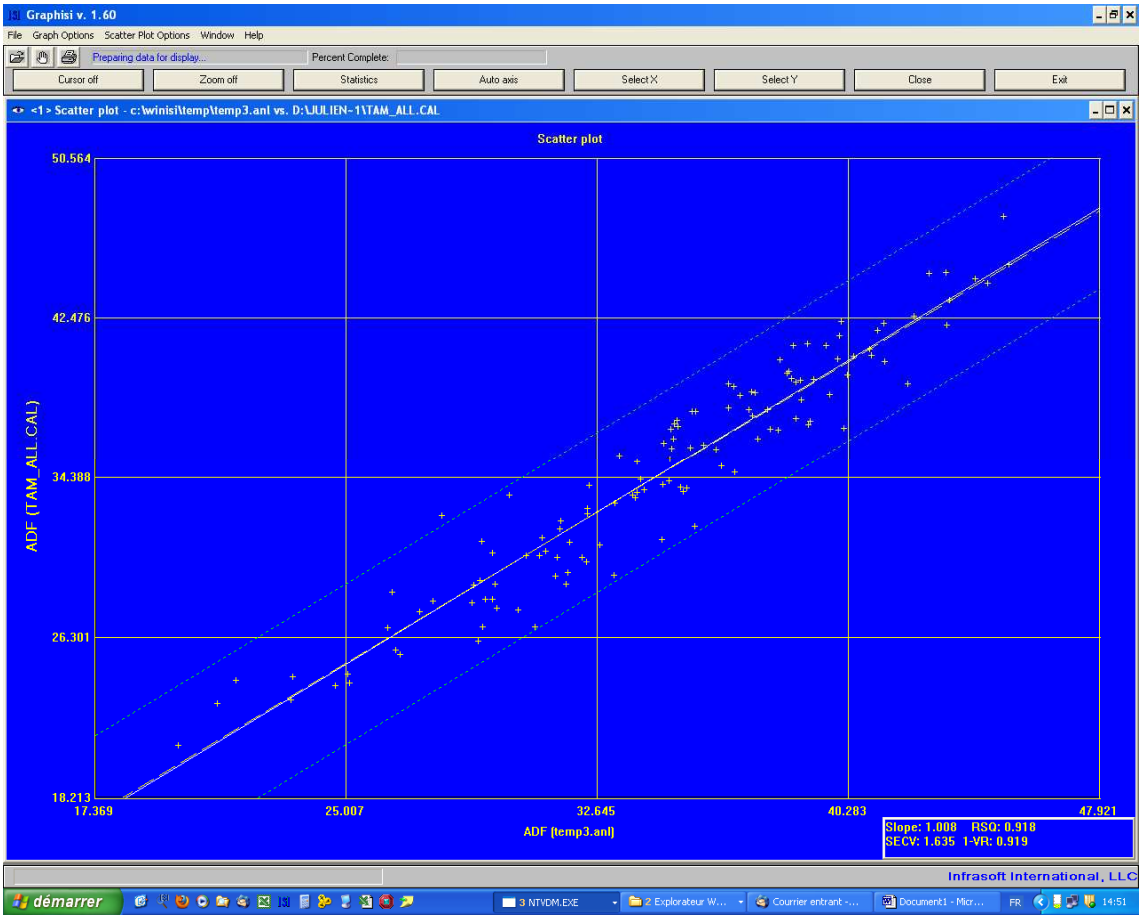

Figure 22 Equation de calibration retenue pour l'Acid Detergent Fiber (ADF)

Les fibres (Cellulose, NDF, ADF, ADL) sont des paramètres relativement bien corrélés : $R^2 > 0.8$ au test de Pearson. La prédiction de ces paramètres par la SPIR est généralement très bonne selon la bibliographie. Les valeurs de RPDcv, toutes assez correctes, vont de 2.18 à 3.54. Les différences entre la SEC et la SECV de ces paramètres sont faibles. Associés à de faibles taux d'erreurs (autour de 4%, sauf pour l'ADL) et de faibles différences entre la SEC et la SECV, (de 0.08 à 0.59) il est possible d'affirmer que la prédiction des fibres est assez bonne.
Cela était assez attendu car les fibres sont présentes en grandes quantités dans les ensilages, en particulier la cellulose, ce qui rend la calibration assez facile pour l'ASD.

- ***DMS***

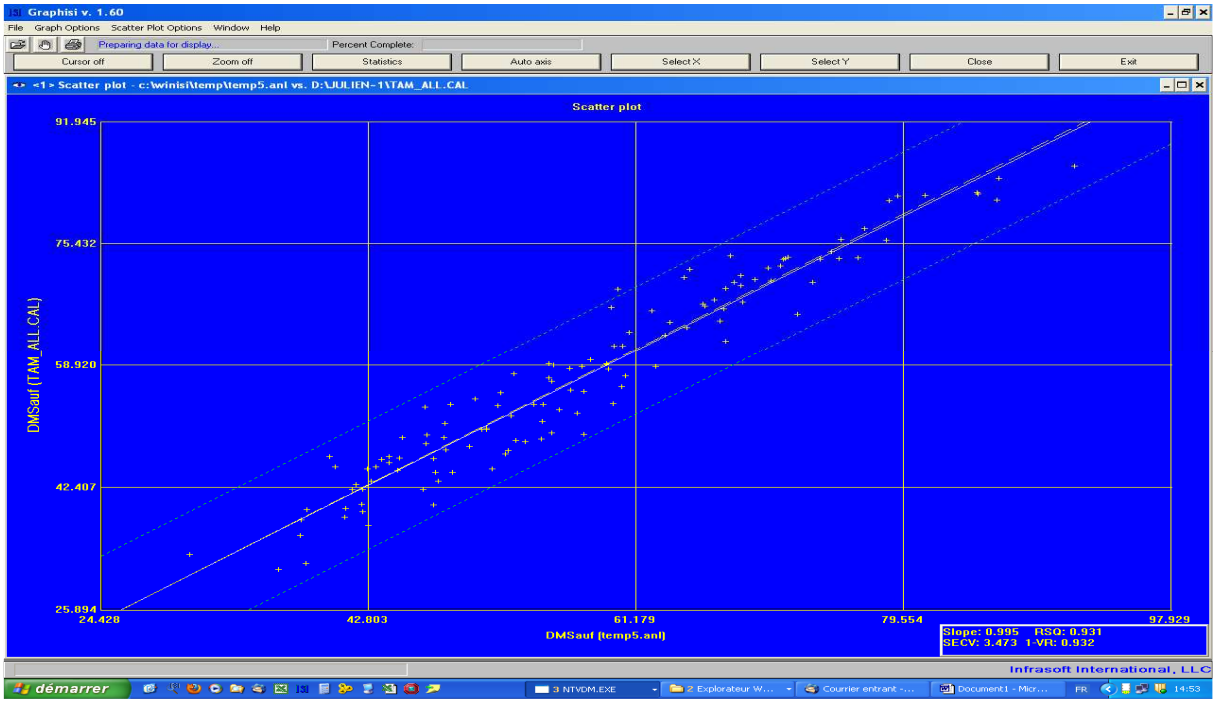

Figure 23 Equation de calibration retenue pour la digestibilité de la matière sèche.

La prédiction de la digestibilité de la matière sèche est très acceptable avec un R^2 de 0.93, un RPDcv de 3.80, le meilleur taux d'erreur de toutes les autres prédictions (3.06 %). La différence entre la SEC et la SECV est cependant assez haute (0.83) mais reste dans la norme.

- ***Taux de matière sèche***

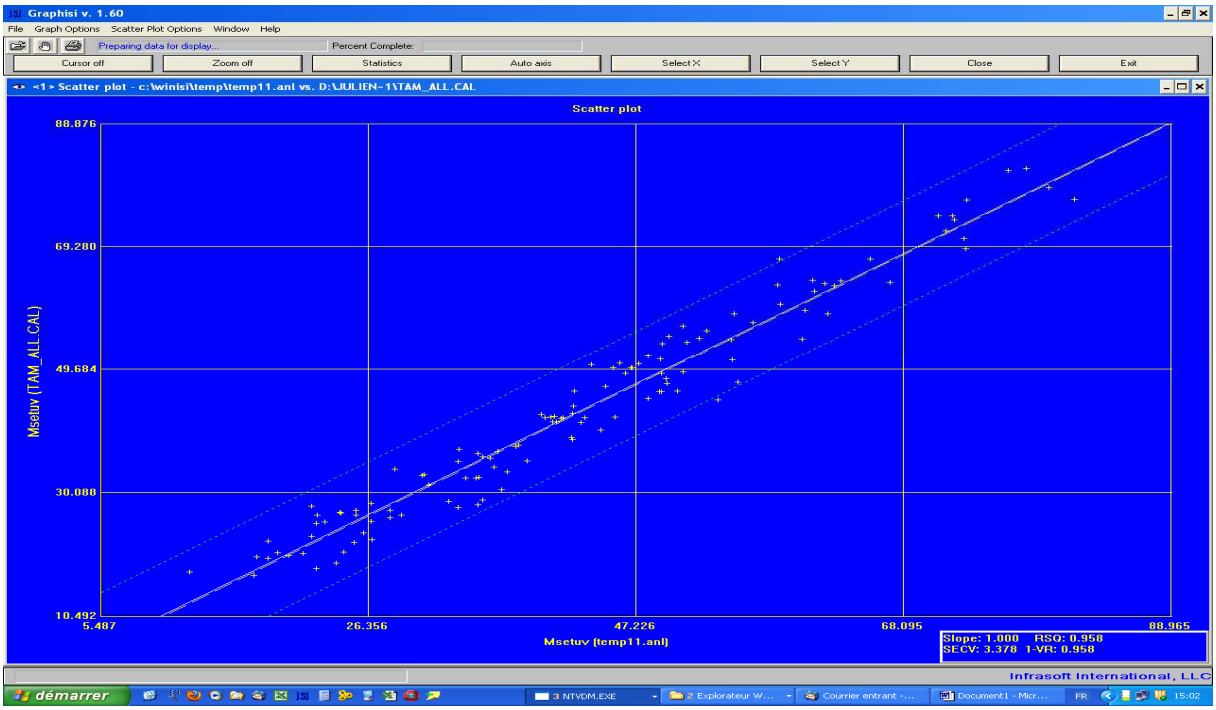

Figure 24 Equation de calibration retenue pour le taux de matière sèche.

Le taux de matière sèche est un paramètre facile à calibrer en spectrométrie proche infrarouge car les larges bandes d'absorption des liaisons OH caractérisent très bien la présence d'eau dans un échantillon. Avec un R^2 de 0.96 et un RPDcv de 4.88 qui sont les meilleures valeurs de toutes les prédictions, la calibration de la matière sèche est considérée comme excellente.

4.6. Sélection des 50 échantillons pour la calibration future avec les valeurs de laboratoire

A la différence de la calibration avec le FOSS où les valeurs prédites sont gratuites (hormis le coût lié à la machine, l'obtention des valeurs de laboratoire un coût. Pour ces raisons, la calibration avec les valeurs de laboratoire ne se focalisera que sur 50 échantillons ayant le plus de variabilité possible. En effet, à raison de 200 € par échantillon, il est préférable de ne sélectionner que 50 échantillons. Pour cela, il faut les sélectionner en fonction de leur variabilité par rapport aux résultats obtenus lors de la saison sèche par une stagiaire, le but de la calibration étant d'obtenir le plus de variabilité possible. Pour cela une compilation des résultats des deux saisons sera effectuée afin de choisir les 50 échantillons les plus représentatifs de la variabilité des ensilages au sein de collection totale (139 spectres pour la saison humide et 209 spectres pour la saison sèche).

4.6.1. Etapes successives

- **1) Compilation de la totalité des spectres des deux saisons**

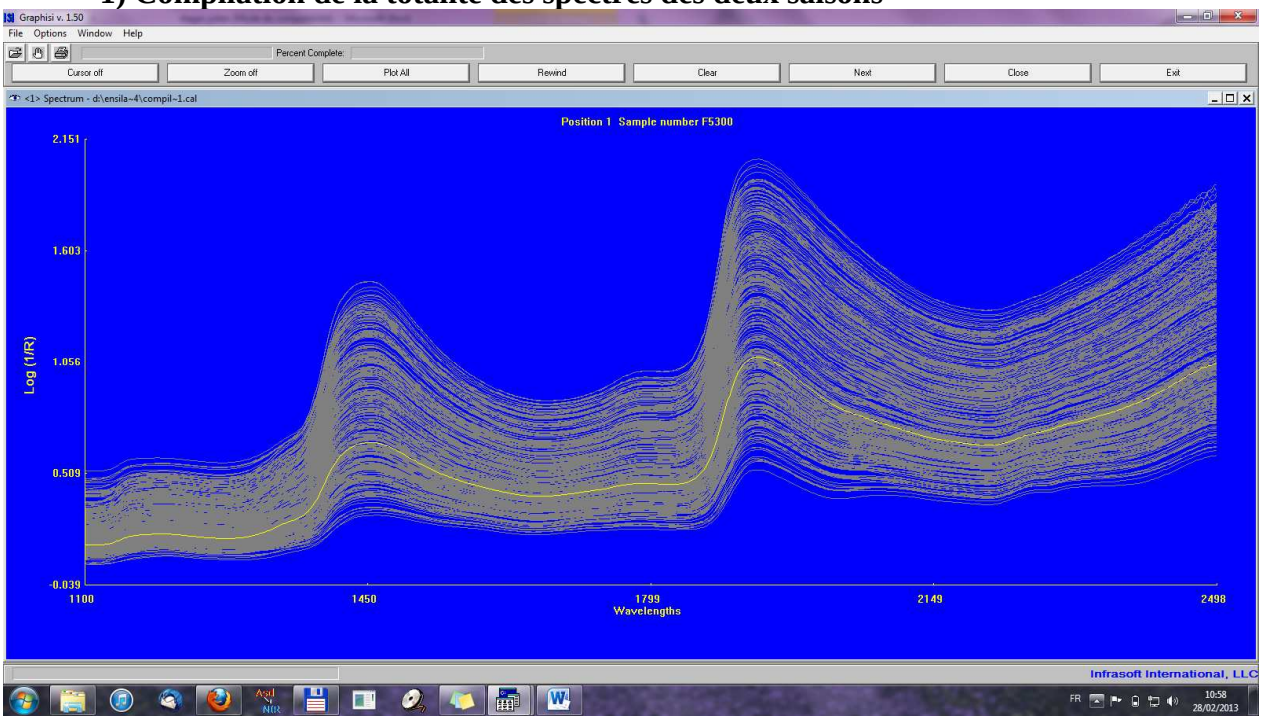

Figure 25 Compilation spectrale des spectres obtenus sur une année (saison humide en vert)

La totalité des spectres de l'année est regroupée afin de pouvoir réaliser une ACP.

- **2) Réalisation d'une ACP sur l'ensemble des spectres**

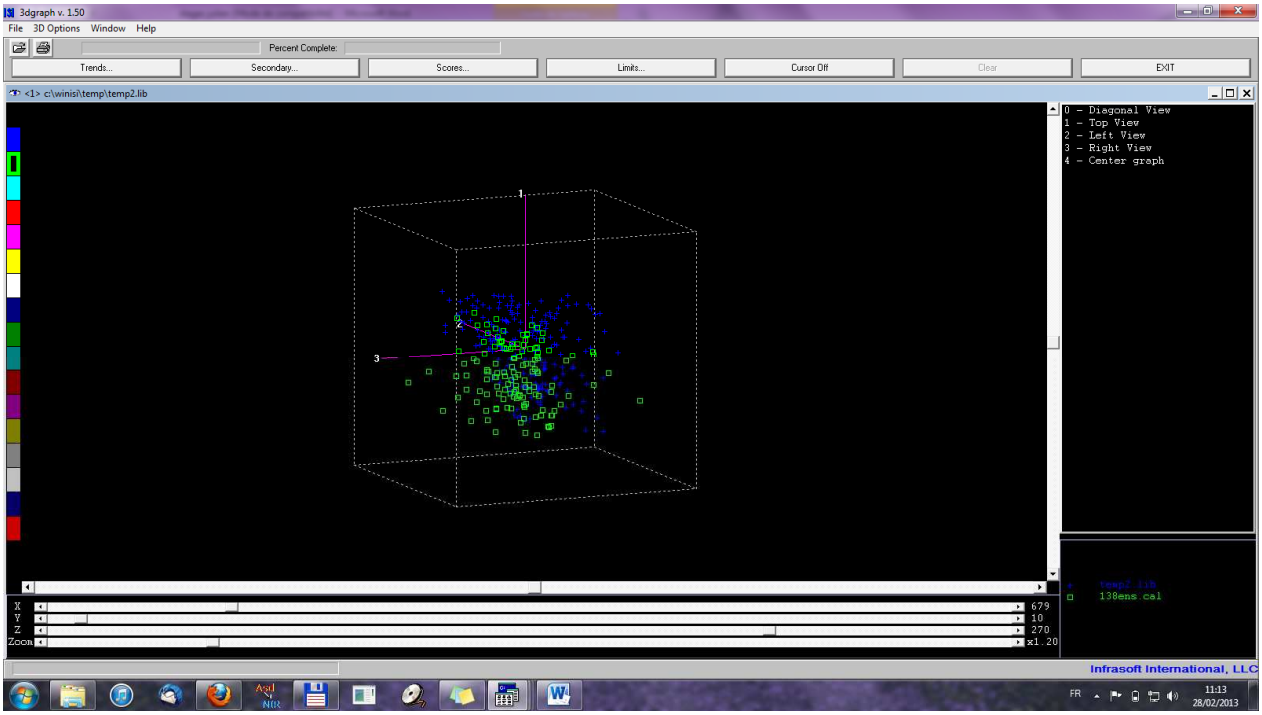

Figure 26 ACP réalisée sur la totalité des spectres

L'ACP réalisée permettra de sélectionner les 50 échantillons possédant le plus de variabilité au sein de la population. L'ACP est réalisée à l'aide du logiciel Winisi II

- **3) Sélection des 50 échantillons**

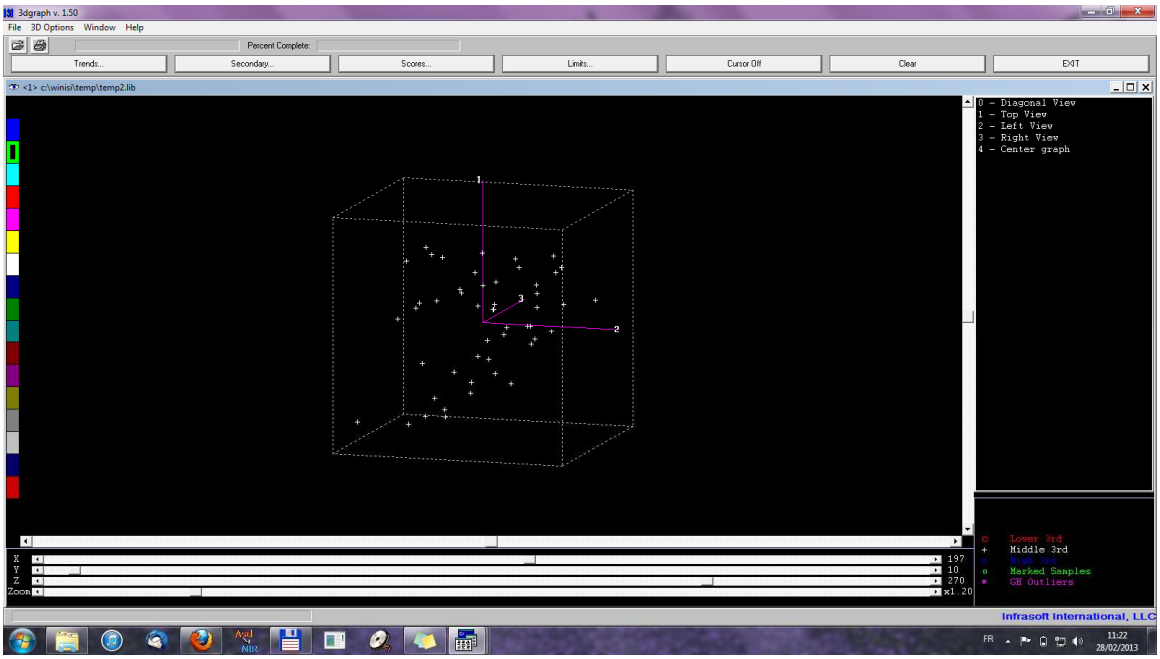

Figure 27 Sélection des 50 échantillons ayant le plus de variabilité

Comme expliqué précédemment, une sélection est effectuée selon la distance de Mahalanobis qui permet la définition du voisinage d'un échantillon, la similitude entre les échantillons et au final la sélection des plus représentatifs.
Ces 50 échantillons seront donc envoyés au laboratoire pour une calibration ultérieure des appareils. Les calibrations s'effectuant sur le même principe qu'avec le FOSS.

4.7. Comparaison avec les résultats de saison sèche

4.7.1 Résultats de saison sèche

Ajoutés aux résultats de saison sèche, ceux de saison humide vont ajouter de la variabilité à l'ASD. Cela permettra d'avoir une calibration sur l'année de l'ASD en prenant en considération la variabilité liée aux saisons. Au final, l'ASD aura été calibré avec 50 échantillons par saison avec les valeurs de laboratoire et 139 (saison humide) + 209 (saison sèche) échantillons avec les prédictions du FOSS.
Pour la saison sèche, le même procédé a été réalisé l'an passé avec l'ASD (calibration avec les valeurs de laboratoire et avec le FOSS). Le Phazir a aussi été calibré suivant le même procédé, mais il ne sera pas développé ici car les résultats ne sont pas encore disponibles.

Tableau 6 Statistiques descriptives de la calibration établie pour l'ASD avec les analyses de laboratoire comme valeurs de référence

Constituant	N	Moyenne	Ecart type	SEC	SECV	SEC-SECV	R^2	SECV/ Moyenne	RPDcv
PROTEIN	47	11,28	3,64	0,7	0,91	-0,21	0,94	8,07	4,00
Cendres	47	9,25	1,89	0,59	1,02	-0,43	0,7	11,03	1,85
CELL	48	32,13	3,49	1,17	1,62	-0,45	0,78	5,04	2,15
NDF	45	66,39	6,96	2,8	3,87	-1,07	0,69	5,83	1,80
ADF	48	36,76	4,83	1,13	1,42	-0,29	0,91	3,86	3,40
ADL	48	3,72	1,22	0,48	0,64	-0,16	0,72	17,20	1,91
DMSauf	49	45,53	10,09	2,51	3,07	-0,56	0,91	6,74	3,29
MS	48	32,16	11,95	1,88	2,05	-0,17	0,97	6,37	5,83

Les valeurs de laboratoire ayant déjà été obtenus pour la saison sèche, une calibration a déjà pu être réalisée avec 50 échantillons. Une fois obtenus, les résultats de saison humide seront compilés à ceux de saison sèche.

Tableau 7 Statistiques descriptives de la calibration établie pour l'ASD avec les prédictions FOSS comme analyses de référence

Constituant	N	Moyenne	Ecart type	SEC	SECV	SEC-SECV	R ²	SECV/ Moyenne	RPDcv
Protéines	199	12,53	3,76	1,01	1,34	-0,33	0,87	10,69	2,81
Cendres	193	9,92	1,9	0,72	0,91	-0,19	0,77	9,17	2,09
Cellulose	202	35,11	4,3	1,3	1,61	-0,31	0,86	4,59	2,67
NDF	198	66,57	7,59	2,53	3,04	-0,51	0,84	4,57	2,50
ADF	198	39,26	4,76	1,59	1,94	-0,35	0,83	4,94	2,45
ADL	199	5,4	1,18	0,43	0,52	-0,09	0,8	9,63	2,27
DMS	192	51,39	12,5	2,94	3,49	-0,55	0,92	6,79	3,58
MS	192	32,16	11,95	1,88	2,05	-0,17	0,97	6,37	5,83

On peut noter que la calibration effectuée avec le FOSS en saison sèche ressemble à celle de saison humide. Les petites différences proviennent de la variabilité liée au climat qui varie en fonction des saisons. On peut noter que là aussi les cendres sont les moins bien prédites avec un R^2 de 0.77 et un RPDcv de 2.09 qui sont les valeurs les plus faibles de tous les échantillons. Une fois encore c'est le taux de matière sèche qui est le mieux prédit avec un R^2 de 0.97 et un RPDcv de 5.83, de loin les meilleurs valeurs de toutes.

On remarque aussi que l'utilisation de valeurs labo ou des valeurs prédites par le FOSS ne change pas beaucoup l'efficacité de la calibration de l'ASD. En effet, on retrouve sensiblement les mêmes valeurs avec les valeurs de laboratoire et celles du FOSS.
En moyenne, la calibration est correcte dans les deux cas avec des statistiques de validation croisée meilleures pour certains paramètres que pour d'autres mais néanmoins tours proches ou supérieurs aux valeurs exigées. On retrouve aussi les mêmes extrêmes (taux de matière sèche le mieux prédit et les cendres les moins bien prédites).

Ceci peut être expliqué par le fait que calibration du FOSS ait été réalisée avec des groupes de calibration très larges (Tableau 9) et donc un très grand nombre de valeurs de laboratoire, de 7 à plus de 37 fois plus que les 50 utilisées dans cette étude. Il est donc possible d'affirmer que grâce à cette calibration préalable du FOSS, la calibration de l'ASD et du PHAZIR peut s'effectuer sans valeurs de laboratoire et être tout aussi performante qu'une calibration suivant le processus usuel.
Ceci est un avantage considérable pour le coût d'une calibration puisque la plus grande dépense hormis l'appareil est le coût des analyses de laboratoire.

Tableau 8 Statistiques descriptives de calibration du FOSS

Constituant	N	Moyenne	Ecart type	SEC	SECV	SEC-SECV	R²	SECV/ Moyenne	RPDcv
PROTEIN	1857	14,62	3,85	0,80	0,82	-0,02	0,95	5,63	4,68
ASH	1631	10,53	2,52	1,12	1,16	-0,04	0,79	11,02	2,17
CELL	1799	27,72	4,30	1,27	1,31	-0,04	0,91	4,73	3,28
NDF	636	50,57	8,09	1,79	2,00	-0,21	0,94	3,95	4,05
ADF	513	29,83	5,75	1,21	1,34	-0,13	0,95	4,50	4,28
ADL	530	4,57	1,43	0,61	0,67	-0,06	0,78	14,71	2,13
DMSauf	360	64,03	11,34	2,86	3,28	-0,42	0,92	5,12	3,46

4.8. Discussion

Plusieurs travaux de recherche ont déjà montré le potentiel du SPIR dans l'estimation de différentes valeurs alimentaires des fourrages (Sinnaeve et al., 1994; Castro, 1997; Hoffman et al., 1999; Valdés et al., 2006). Cependant, ceci a rarement été réalisé à l'aide de spectromètres portables et sur du matériel frais.

Nous avons considéré que les équations de prédiction seraient acceptables si le coefficient de détermination de validation croisée (R^2) et le Ratio performance deviation (RPD = SD/SECV) étaient supérieurs à 0,8 et à 2,5, respectivement (Valdés et al., 2006).

Pour chaque paramètre analytique (hormis les cendres), il est possible d'obtenir des R^2 allant de 0.8 à 0.96 et des RPDcv supérieurs à 2. Ceci indique que le modèle prédictif mis en place pour l'ASD permettrait de prédire très correctement les valeurs alimentaires et la MS de l'ensilage au sein même des fermes.

La calibration de l'ASD est donc très acceptable. Le paramètre le mieux prédit est la matière sèche et le paramètre le moins bien prédit sont les cendres, conformément aux résultats annoncés dans la bibliographie.

On peut également avancer qu'il est possible d'envisager à l'avenir la calibration de l'ASD pour la mesure des constituants nutritionnels sans le recours à des analyses de référence en laboratoire, l'utilisation de mesures de référence prédites par le FOSS étant suffisantes pour obtenir une calibration correcte. Cela fera encore faire des économies.

Les résultats obtenus par l'ASD est donc prometteur quant à la possibilité d'information et de conseil aux éleveurs en temps réel.

5. Les facteurs associés à la qualité de l'ensilage à la Réunion

La qualité de l'ensilage est une donnée primordiale pour l'établissement de rations équilibrées et pour la réalisation des objectifs établis par l'éleveur. Le chapitre 1 a permis de lister les pratiques agricoles connues comme influençant la qualité de l'ensilage. Les enquêtes réalisées auprès des éleveurs a permis de confirmer certains de ces facteurs comme étant les plus associés à la qualité de l'ensilage par les acteurs de la filière : selon les techniciens de l'ARP, le fourrage est fauché trop vieux et n'est pas sassez séché ce qui entraîne des valeurs protéiques non satisfaisantes et un taux de matière sèche trop faible pour une bonne conservation de l'ensilage. Sur 49 éleveurs enquêtés, 17 ont évoqué le fait de faner comme un facteur déterminant de la qualité de leur ensilage. 11 éleveurs estiment que la qualité de leur ensilage est dépendante de la météo durant le chantier et ceci est souvent évoqué comme une « fatalité » puisqu'il s'agi pour eux d'un paramètre non maîtrisable. Concernant le stade de coupe, 10 éleveurs sur 28 jugent qu'il n'est pas idéal lors de la coupe et que cela nuit à la qualité du produit fini. L'état de la prairie serait à améliorer pour deux éleveurs et le type d'herbe semée serait à adapter pour deux autres (remplacer le kikuyu par des espèces tempérées dans les deux cas). Enfin, la mélasse et les conservateurs amélioreraient la qualité de l'ensilage pour trois éleveurs.

L'objectif de la partie suivante est d'identifier et hiérarchiser les différents déterminants de la qualité nutritionnelle et de la qualité de conservation des ensilages d'herbes en balle ronde à la Réunion. Il s'agit de rechercher dans le contexte réel de la production bovine les facteurs liés aux pratiques de l'éleveur et au milieu qui agissent négativement ou positivement sur la qualité de l'ensilage. Nous allons donc analyser statistiquement l'ensemble des données acquises lors de la saison humide ainsi que lors de la saison sèche.

Le stage a constitué une seconde campagne d'analyse de la qualité des ensilages d'herbe à la Réunion. La précédente campagne avait été effectuée durant la saison sèche 2011 (mars - septembre) ; les prélèvements qui avait été effectués correspondaient à des ensilages confectionnés durant la saison des pluies 2010-2011 (décembre 2010 – mai 2011) ; dans le cadre de ce stage, les prélèvements ont été effectués entre octobre 2012 et janvier 2013, ce qui correspond à des ensilages principalement confectionnés durant la saison sèche 2012 (juin – novembre).

Les principales caractéristiques des 49 exploitations enquêtées sont données dans le tableau 15. L'ensemble des données a été traité à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, 2003).

Tableau 9 Principales caractéristiques des exploitations enquêtées

Données	Hauts de l'Ouest	Plaine des Cafres	Plaine des Palmistes	Saint-Joseph	Sainte Marie (Saint-Denis)
Nombre d'élevages	7	30	3	8	1
Pluviométrie / an (mm)	915	1702	2841	3855	2655
Température moyenne (℃)	16.1	13.2	18.7	16.5	16.3
SAU moyenne (ha)	30.27	29.41	41.33	11.5	500
Cheptel moyen (ha)	84.14	78.8	50.67	49.63	1200

Une grande partie (60%) des éleveurs enquêtés appartiennent à la filière Lait. Ceci est du au fait qu'à la période où la première série d'enquêtes a été menée (saison sèche), les naisseurs utilisaient peu d'ensilage car le troupeau pâturait. L'enquête de saison humide devant être réalisée sur les mêmes exploitations qu'en saison sèche, il n'y a donc pas eu d'autres éleveurs enquêtés. Cet échantillonnage n'est donc pas représentatif de la population d'élevages bovins dont un peu plus des trois quarts appartiennent à la filière viande.

5.1. Variables retenues

La réalisation de la calibration des spectromètres a permis l'obtention de nombreuses valeurs alimentaires et d'indices de qualité. 11 valeurs ont été retenues afin d'être confrontées avec les données récoltées lors des enquêtes. La variable prot est très corrélée à pdin et pdie R^2 = 0.99 et 0.95 respectivement, $p < 0.001$). La variable cell est également très corrélée à ndf + adf (R^2 = 0.97, $p < 0.001$). Nous avons choisi de retenir ndf et adf et d'éliminer pdin, pdie et cell. Nous avons calculé un nouvel indicateur, le taux d'azote dégradable, qui est égal à : (pdin – pdie) / ufl. Le déficit en azote dégradable altère la digestion ruminale et diminue l'ingestion ; le déficit tolérable maxi chez la vache laitière est de –8 gr / UFL / j. A La Réunion, ce sont surtout les graminées fourragères tropicales qui sont pauvres en azote dégradable (canne à sucre, paille de canne, canne fourragère, chloris).
Ces valeurs vont donc être confrontées aux pratiques des éleveurs lors des chantiers afin de déterminer et de hiérarchiser les meilleurs conditions d'un chantier d'ensilage. Le but étant d'optimiser la qualité nutritionnelle et la conservation des balles rondes à la Réunion. Ces valeurs sont le pH et la matière sèche pour les indices de qualité de conservation et les NDF, ADL et ADF (fibres), les protéines, les cendres, le taux d'azote dégradable (pdi.deg), la digestibilité de la matière sèche (dMS) et l'ingestibilité (ing) pour les valeurs alimentaires (Tableau 10).

```
       ms              ash               prot            pdi.deg
 Min.   :14.42   Min.   : 6.228   Min.   : 5.401   Min.   :-18.40
 1st Qu.:23.69   1st Qu.: 9.057   1st Qu.: 9.635   1st Qu.: 10.37
 Median :33.41   Median :10.156   Median :12.171   Median : 20.86
 Mean   :36.99   Mean   :10.385   Mean   :12.481   Mean   : 20.88
 3rd Qu.:48.32   3rd Qu.:11.183   3rd Qu.:15.014   3rd Qu.: 32.43
 Max.   :81.43   Max.   :20.966   Max.   :20.861   Max.   : 53.12

      ndf             adf             adl             dms
 Min.   :37.33   Min.   :17.64   Min.   :1.385   Min.   :19.95
 1st Qu.:57.11   1st Qu.:34.02   1st Qu.:4.011   1st Qu.:42.57
 Median :64.17   Median :38.65   Median :4.897   Median :49.90
 Mean   :63.02   Mean   :37.84   Mean   :4.899   Mean   :52.78
 3rd Qu.:69.49   3rd Qu.:42.23   3rd Qu.:5.788   3rd Qu.:64.80
 Max.   :82.15   Max.   :54.11   Max.   :8.862   Max.   :93.76

      ufl              ing              ph
 Min.   :0.3475   Min.   :12.52   Min.   :3.700
 1st Qu.:0.5873   1st Qu.:12.73   1st Qu.:4.753
 Median :0.6439   Median :12.81   Median :5.085
 Mean   :0.6631   Mean   :12.83   Mean   :5.152
 3rd Qu.:0.7498   3rd Qu.:12.95   3rd Qu.:5.503
 Max.   :0.9153   Max.   :13.14   Max.   :9.110
```

Tableau 10 Représentation des 11 variables à analyser ainsi que leurs composantes statistiques principales.

5.2. Analyse en composantes principales (ACP)

On dispose ainsi d'un tableau croisant 290 lignes (prélèvements sur une année) et 11 colonnes, les variables de composition. La première analyse consiste à analyser les facteurs de variabilité de ces variables de composition parmi les variables à expliquer c'est à dire les variables qui caractérisent la conduite des chantiers et de la conservation des balles rondes (de la fauche de l'herbe à l'ouverture de la balle ronde).
On réalise une analyse en composantes principales normée (les variables sont centrées et réduites) sur le tableau des variables à expliquer, puis une classification ascendante hiérarchique sur les coordonnées des lignes sur les axes principaux.

5.2.1. Objectifs

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode très puissante pour explorer la structure d'un nuage de points définis par de nombreuses variables (d'où le terme d'analyse multidimensionnelle). Le principe de l'ACP est d'obtenir une représentation approchée du nuage de points dans un sous-espace de dimension faible (k) par projection sur k axes bien choisis, qui maximisent la variance du nuage projeté. Les composantes principales sont les n vecteurs ayant pour coordonnées celles des projections orthogonales des n éléments du nuage sur les k axes principaux.
L'ACP construit ainsi de nouvelles variables, artificielles, et des représentations graphiques permettant de visualiser les relations entre variables, ainsi que l'existence éventuelle de groupes d'éléments et de groupes de variables (variables corrélées).
Ainsi, les représentations graphiques des variables et des individus (en lignes) sur les axes factoriels constituent un des outils d'aide à l'interprétation. Deux variables proches l'une de l'autre sont corrélées positivement, c'est-à-dire qu'on les retrouve souvent associées chez les même éleveurs. A l'inverse, 2 variables diamétralement opposées sont corrélées négativement. Deux éleveurs proches sur un plan factoriel donné ont en commun des niveaux identiques pour une grande partie des variables descriptives.

5.2.2. Résultats

La classification ascendante hiérarchique permet de classer les éleveurs en groupes homogènes par rapport à un critère de similarité donné. En utilisant le critère de Ward, on aboutit à des groupes qui ont à la fois la variance intra-groupe la plus petite et la variance inter-groupe la plus élevée (LEBART et al., 2006). Elle peut s'appliquer soit directement sur le jeu de données centrées réduites, soit sur les coordonnées factorielles de l'ACP (c'est cette option qui a été retenue dans le cas présent).

Trois axes ont été » retenus ; ils représentent près de86% de la variance totale du tableau. On a ainsi un nouveau tableau constitué de 3 nouvelles variables, qui sont des combinaisons linéaires des 11 variables de départ, indépendantes entre elles, et qui synthétisent 86% de la variance.

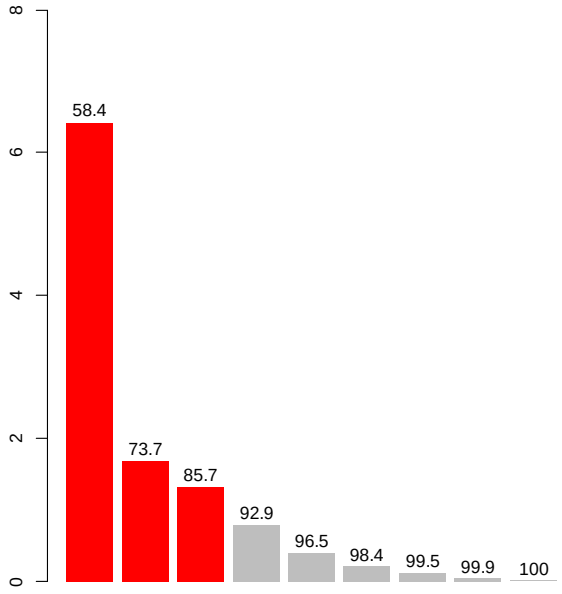

Figure 28 Représentation des valeurs propres et du pourcentage de variance cumulé par les différents axes

Dans les figures suivantes (29 à 33), les groupes d'individus sont représentés dans un gradient de couleur, du plus clair au plus foncé.

D'amblée on peut remarquer plusieurs éléments au sein de celles-ci. L'axe 1 oppose des ensilages fibreux (à droite) aux ensilages riches en protéine, en énergie, et facilement digestible (à gauche). L'axe 2 oppose des fourrages riches en MS (en haut) à des fourrages riches en cendres (en bas). L'axe 1 sera donc nommé axe qualité et l'axe 2 axe conservation. Le pH qui représente l'axe 3 n'est pas significatif puisqu'il est trop court dans la représentation axiale. On ne le prendra donc pas en considération.

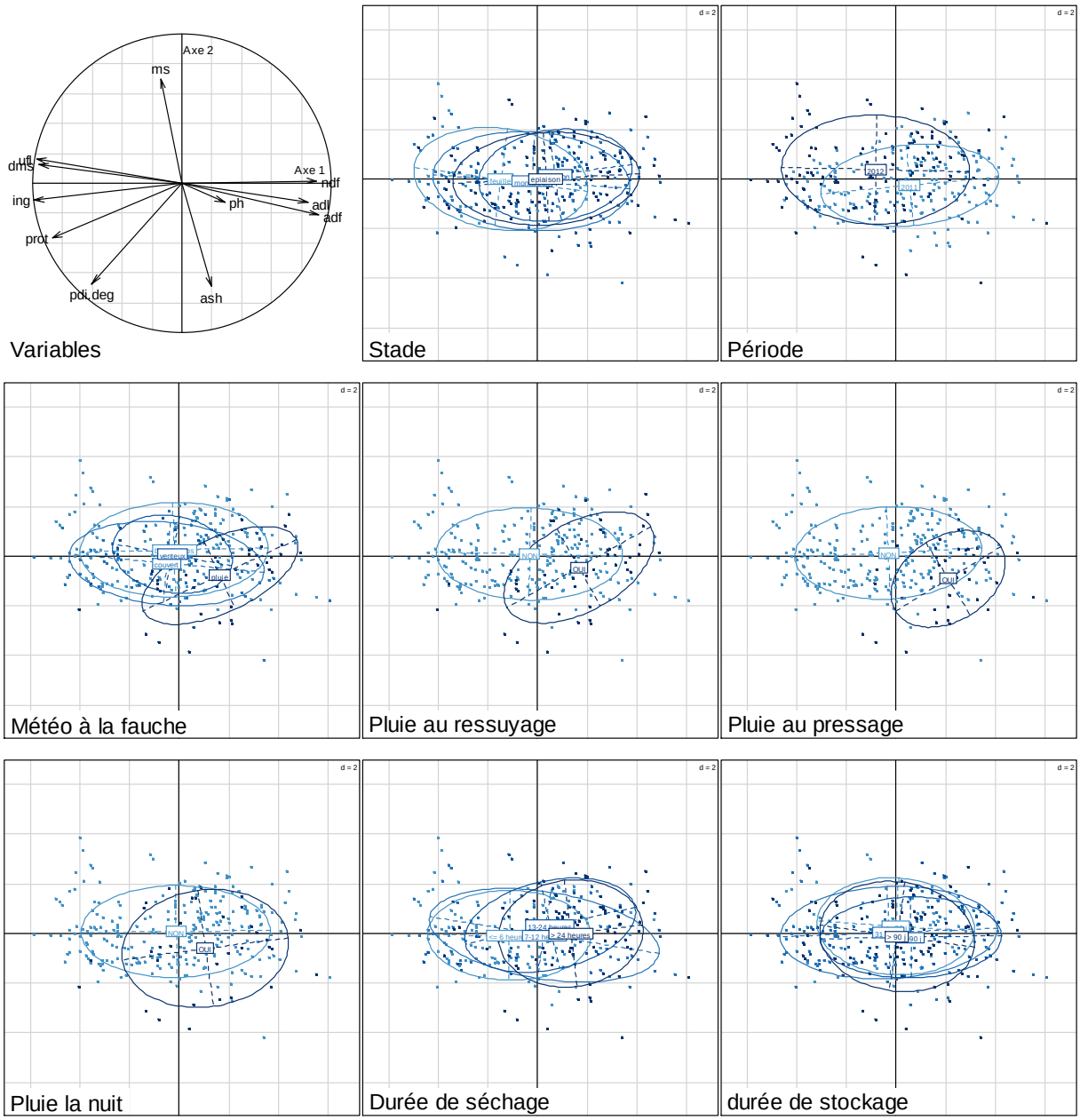

Figure 29 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe)

Globalement, on voit que plus l'herbe est fauchée jeune, plus il y aura de protéines et de fibres et à contrario moins de fibres. 2012 est une année où globalement le taux de MS est meilleur que 2011 et où les protéines et l'énergie ont été plus fortement rencontrés, au contraire des fibres. On voit aussi que pour la météo, le paramètre « pluie » se distingue bien et montre que quand il pleut que ce soit pendant la fauche, au ressuyage, au pressage ou pendant la nuit, la qualité et moindre avec plus de fibres et de cendres et moins de MS. En ce qui concerne la durée de séchage et de stockage, on ne remarque de différences significatives. Toutefois, on voit que le taux de MS est augmenté légèrement par un temps de séchage plus long. Cette différence n'est pas trop nette car on peut penser qu'un temps de séchage n'est bénéfique sur le taux de MS que si la météo est bonne durant celle-ci. Enfin, on remarque un étalement plus long sur l'axe 1 (axe qualité) si le temps de stockage des balles rondes est faible ce qui veut dire qu'un stockage trop long n'est pas trop bon pour la qualité alimentaire de l'ensilage. Par contre on remarque l'inverse avec la MS.

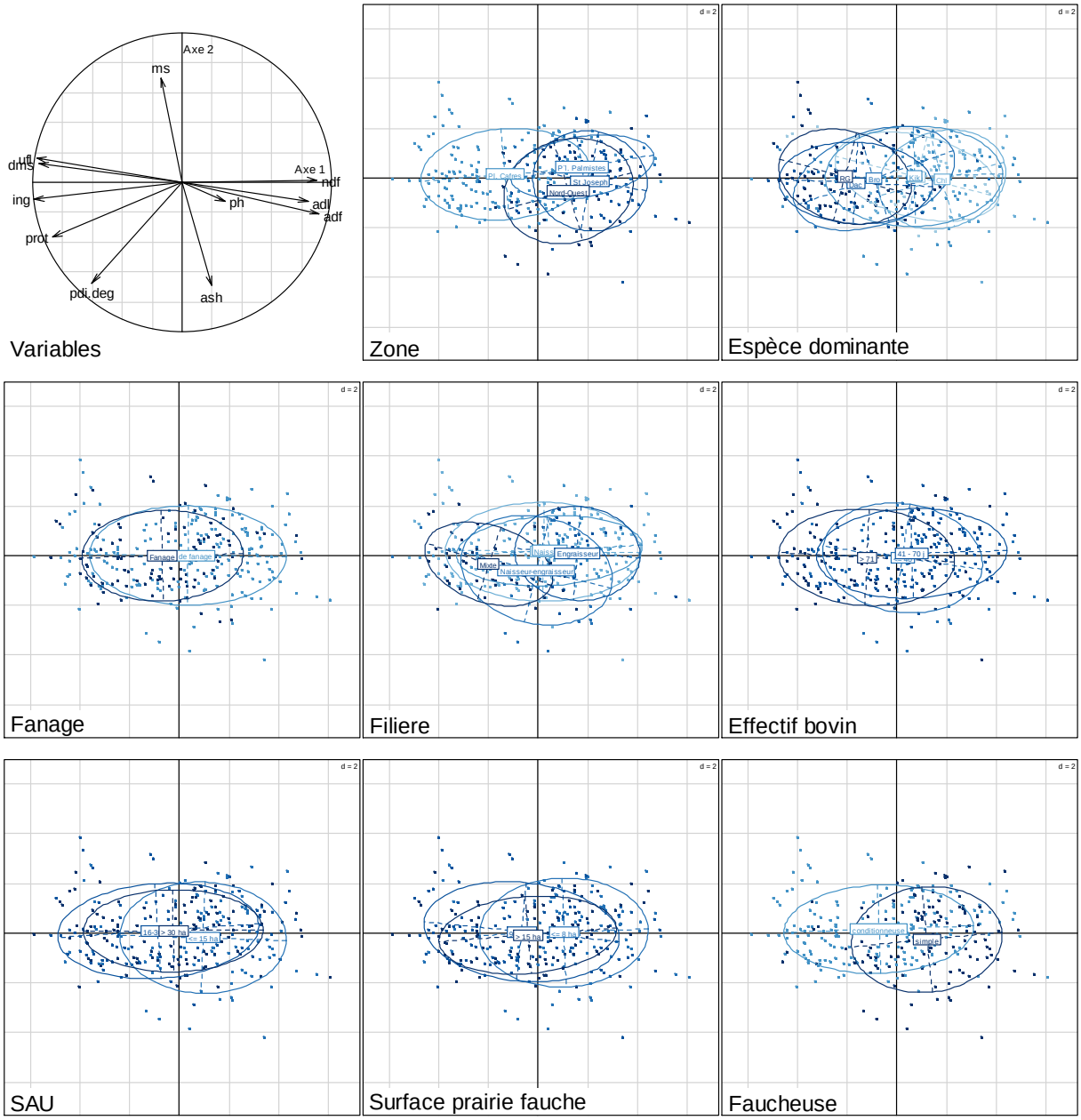

Figure 30 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe)

On voit ici que la zone « Plaine des Cafres » se démarque des autres zones quant à la qualité des ensilages. En effet, alors que les 3 autres zones sont plutôt vers la droite de l'axe 1, la Plaine des Cafres est vers la gauche, c'est-à-dire que la qualité y est meilleure avec de meilleurs taux de protéines et d'énergie. Par ailleurs on remarque que l'association RG-Dactyle et dans une moindre mesure le Brome, toutes des graminées tempérées, donnent des ensilages plus riches en protéines et en énergie. On voit aussi que le kikuyu se démarque des autres espèces par sa moindre mesure à sécher convenablement puisque la teneur en matière sèche d'un ensilage à base de celle-ci est plus faible. La pratique du fanage est aussi un facteur de meilleure qualité. Quant à la filière, les éleveurs mixtes (lait+naisseur+engraisseur) s'en sortent également mieux que les éleveurs ne pratiquant qu'un seul type d'élevage, les engraisseurs en particulier. Cela se retrouve chez les éleveurs ayant plus de 71 têtes de bétail. On peut expliquer cela par le fait que les éleveurs ayant plus le plus de moyens entretiennent mieux leur prairie et font peut être plus attention à leur itinéraires techniques que les autres.

On remarque que la SAU et la surface de prairie de fauche n'a pas vraiment d'incidence sur la qualité de l'ensilage. Enfin, les éleveurs possédant une faucheuse conditionneuse ont globalement une meilleure qualité et un meilleur taux de MS que ceux possédant une faucheuse simple.

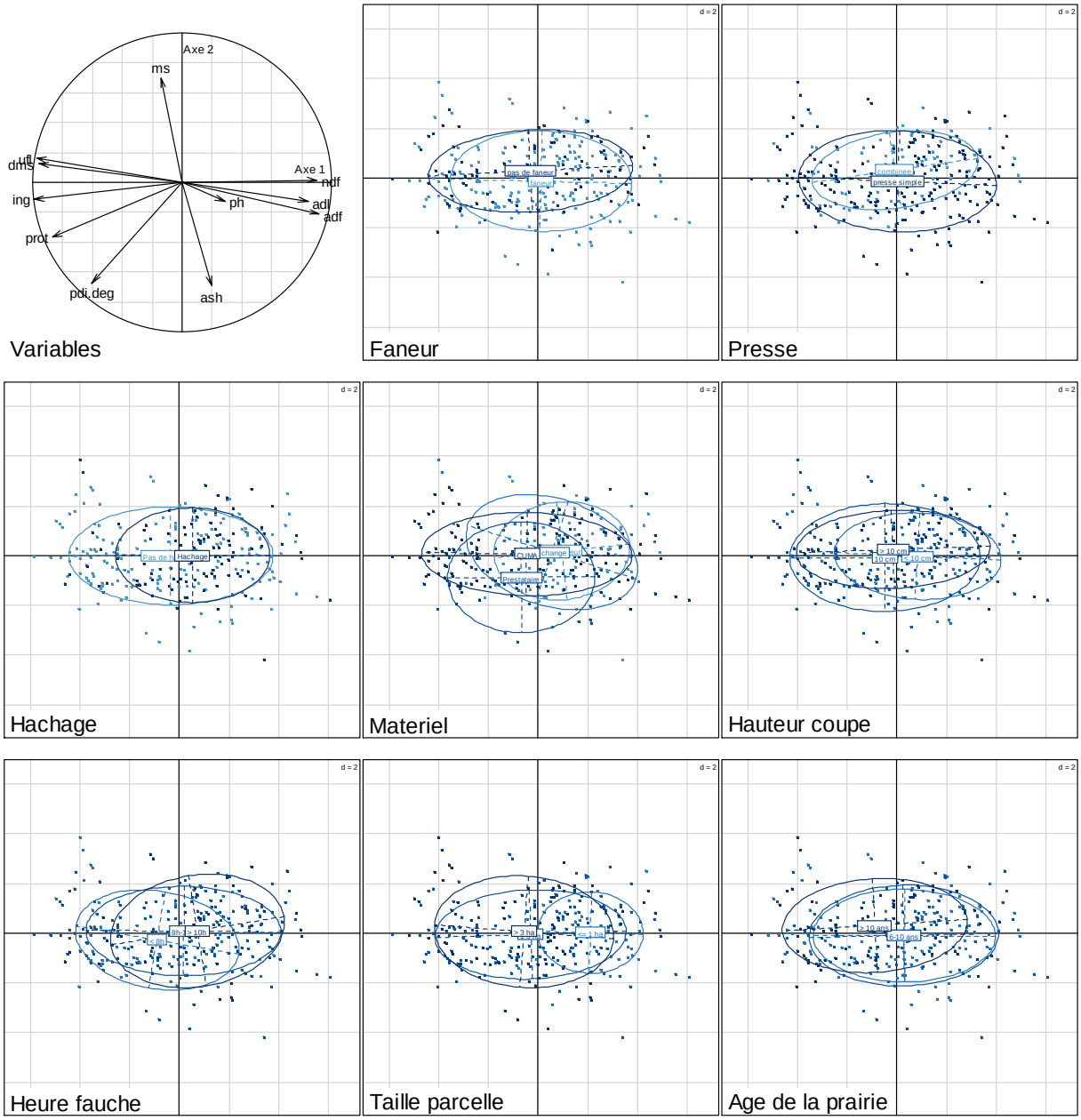

Figure 31 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe)

Le fait qu'un éleveur possède son propre matériel n'a pas de conséquences sur la qualité de l'ensilage. Le fait de hacher le fourrage non plus, ni la hauteur de coupe. Par contre, le fait d'utiliser une faucheuse combinée permet de gagner en MS par rapport à la presse simple. De plus, faucher assez tôt (avant 8h) permettrai de gagner en qualité. Enfin, on retrouve une meilleure qualité d'ensilages au sein des surfaces de plus de 1 ha ainsi qu'avec des prairies de plus de 10 ans.

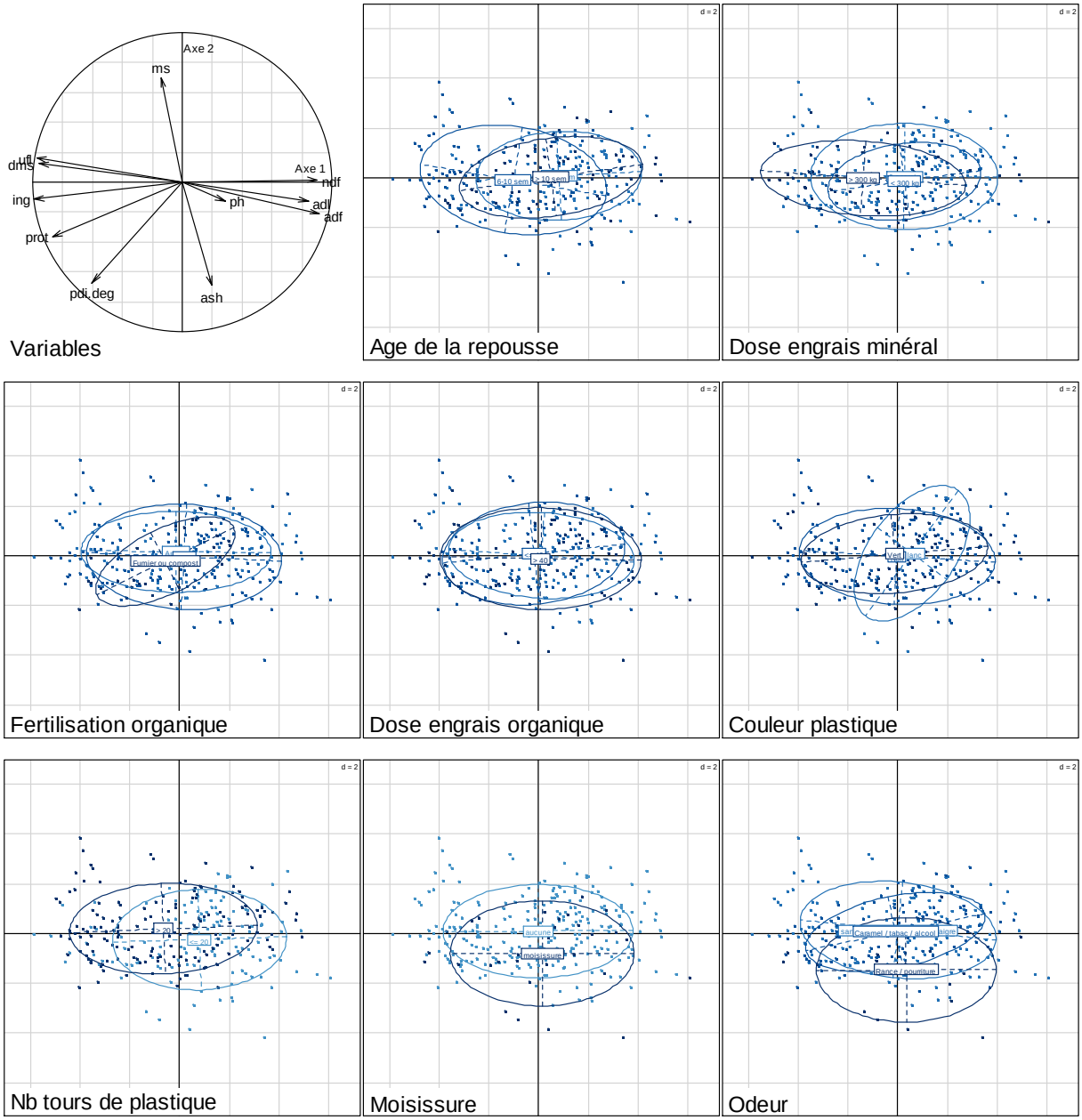

Figure 32 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe)

On voit qu'un temps de repousse de l'herbe allant de 6 à 10 semaines paraît optimal autant pour la teneur en protéines et en énergie qu'en MS. Pour la fertilisation minérale, on voit que si la dose apportée est supérieure à 300 kg/ha, la teneur en protéines et en énergie sera plus élevée. On remarque aussi que concernant la fertilisation organique, du fumier augmentera plutôt la teneur en azote dégradable (PDI.deg). Au sujet de la dose, il n'y a pas d'éléments qui permettent de dégager de conclusion. On note également qu'un plastique de couleur verte engendre un ensilage de moins bonne qualité que s'il était noir ou blanc, ainsi que si 20 tours de plastiques minimum ont été utilisé pour l'enrubannage des balles rondes. Enfin, on voit clairement que des ensilages possédant des moisissures et qui sentent le rance et le pourri ont un taux de MS plus faible.

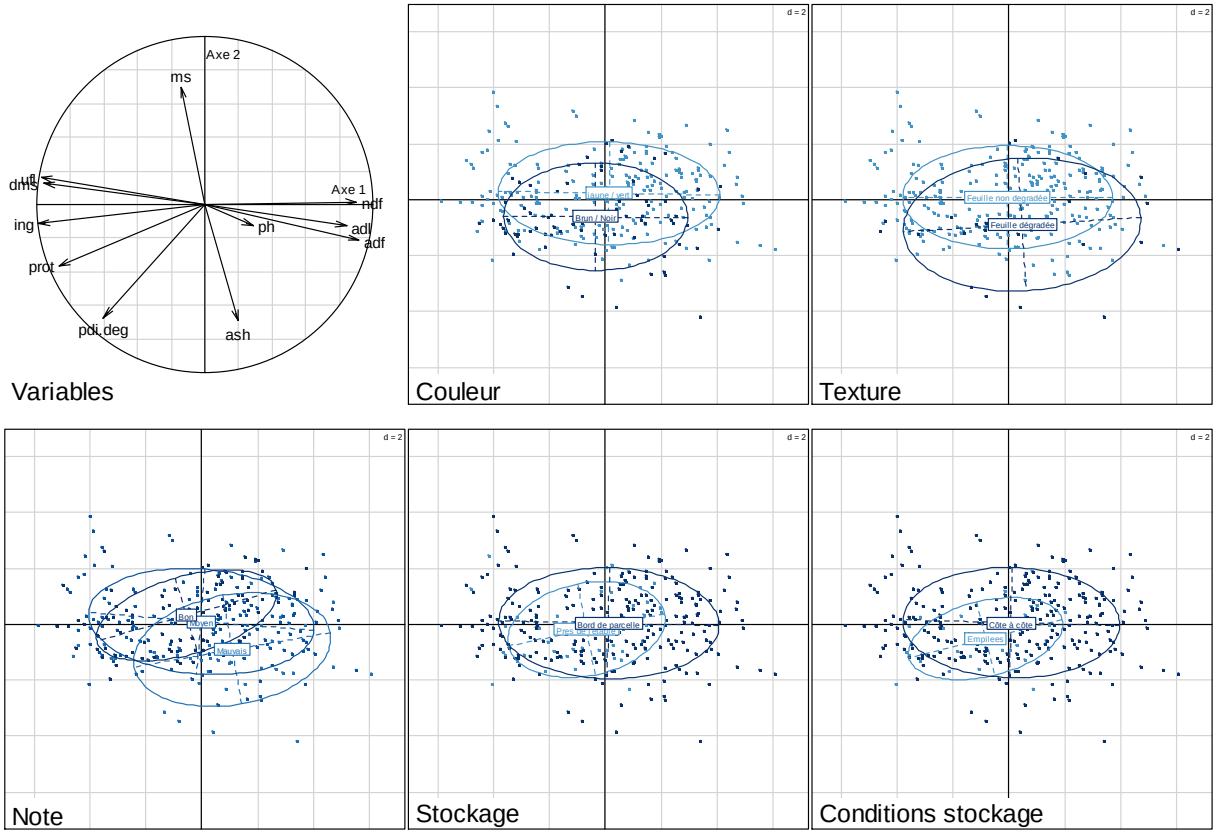

Figure 33 Représentation du plan factoriel 1-2 : représentation des variables (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon différents indicateurs extérieurs, précisés en bas à gauche de chaque graphe)

On remarque ici également qu'un aspect brun/noir de l'ensilage correspondait a un ensilage de mauvaise qualité, à contrario d'un ensilage d'aspect vert ou jaune. Il en va de même pour un ensilage ayant les tiges dégradées ainsi que pour un ensilage où l'éleveur a attribué une mauvaise note. Pour le stockage, on voit qu'il n'y a pas de différences significatives qu'elles aient été misent en bord de parcelle ou près de l'étable. Par contre, il s'avère que des bottes stockées côtes à côtes sont de meilleures qualité et ont un meilleur taux de MS que si elles sont empilées.

5.3. Analyse en composantes principales sur variables instrumentales (ACPvi)

Contrairement à l'analyse précédente ou les indicateurs de conduite du chantier n'entraient pas directement en compte dans l'analyse (ACP), l'analyse sur variables instrumentales est une analyse qui couple un tableau de variables à expliquer (*Y*, les variables de composition des ensilages) à un tableau de variables explicatives (*X*, les variables décrivant la conduite des chantiers), de manière similaire à ce que l'on observe dans un modèle linéaire classique ou une variable *y* est reliée à une variable x par la relation $y = ax + b + \square = \hat{y} + \square$ ($\hat{y}$ est la valeur prédite et le résidu); la position des individus sur les axes est donc une position prédite ($\hat{y}$) par les variables du tableau X.

L'analyse précédente (ACP) a permis d'effectuer un premier tri des variables à expliquer : perQ, four1Q, stadeQ, age.fourQ, taille.parcelleQ, dose.minQ , pluie.ressQ, duree.sechageQ et faucheuseQ étant celles possédant le plus de variabilité . La variable four1Q a été réorganisée en 2 modalités, 1 pour graminées tropicales et 2 pour graminées tempérées. Toute l'information est contenue dans la figure suivante.

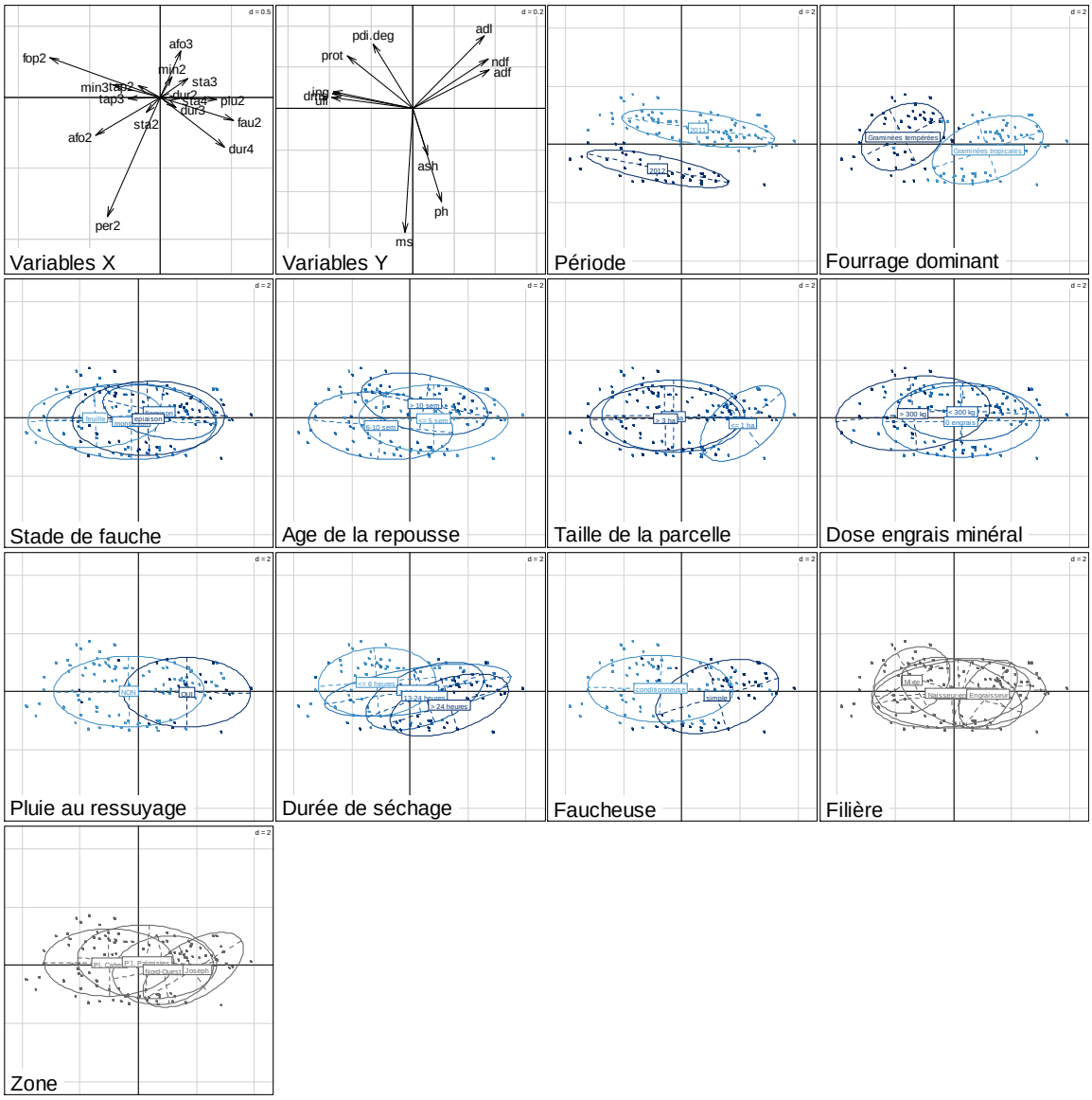

Figure 34 Représentation du plan factoriel 1-2 de l'ACPVI: représentation des variables X et Y (en haut à gauche) et des individus, regroupés selon les différents indicateurs du tableau X, précisés en bas à gauche de chaque graphe) ; les deux derniers graphes représentent les individus, regroupés selon la zone et la filière, deux variables n'ayant pas participé à l'analyse (non inclues dans X).

L'axe 1 montre l'association entre le fourrage principal et la qualité nutritive, à gauche, et l'association entre les variables durée de séchage, pluie au ressuyage et présence d'une faucheuse et la fibrosité des fourrages, à droite. L'axe 2 est quasi exclusivement défini par l'association entre la période et le taux de MS. On voit sur les deux premiers graphes des individus, que les groupes définissant les 2 périodes et les groupes définissant les 2 types de graminées sont quasiment disjoints, sur les axes 2 et 1 respectivement (et ce n'est le cas pour aucun autre indicateur). On peut en conclure que les variables période et type de graminées sont les principaux indicateurs de la teneur en MS et de la qualité nutritive des fourrages, respectivement. Par ailleurs, à l'exception de la variable période, les modalités des indicateurs se différencient sur l'axe 1 (axe « qualité »), indépendamment de la période (ce qui montre que ces indicateurs sont pertinents quel que soit la période).

5.4. Analyses inférentielles (modèles linéaires)

5.4.1. Variables à modéliser

Afin de réduire le nombre de modèles à réaliser, nous avons fait un tri parmi les 11 valeurs retenues afin de n'obtenir qu'une seule variable par variable alimentaire et par variable de conservation. Cette sélection s'effectue à l'aide de l'analyse des corrélations entre les variables (figure 35). On peut voir ainsi une forte corrélation entre prot et pdi.deg (R^2=0.9), entre ndf et adf (R^2=0.91), entre dms et et ufl (R^2=0.99), dms et ing (R^2=0.94) et ing et ufl (R^2=0.95). Nous avons choisis de modéliser la MS pour la qualité de conservation, ainsi que les protéines, le NDF et les UFL pour la matière azotée, les fibres et l'énergie respectivement, soit une variable par catégorie.

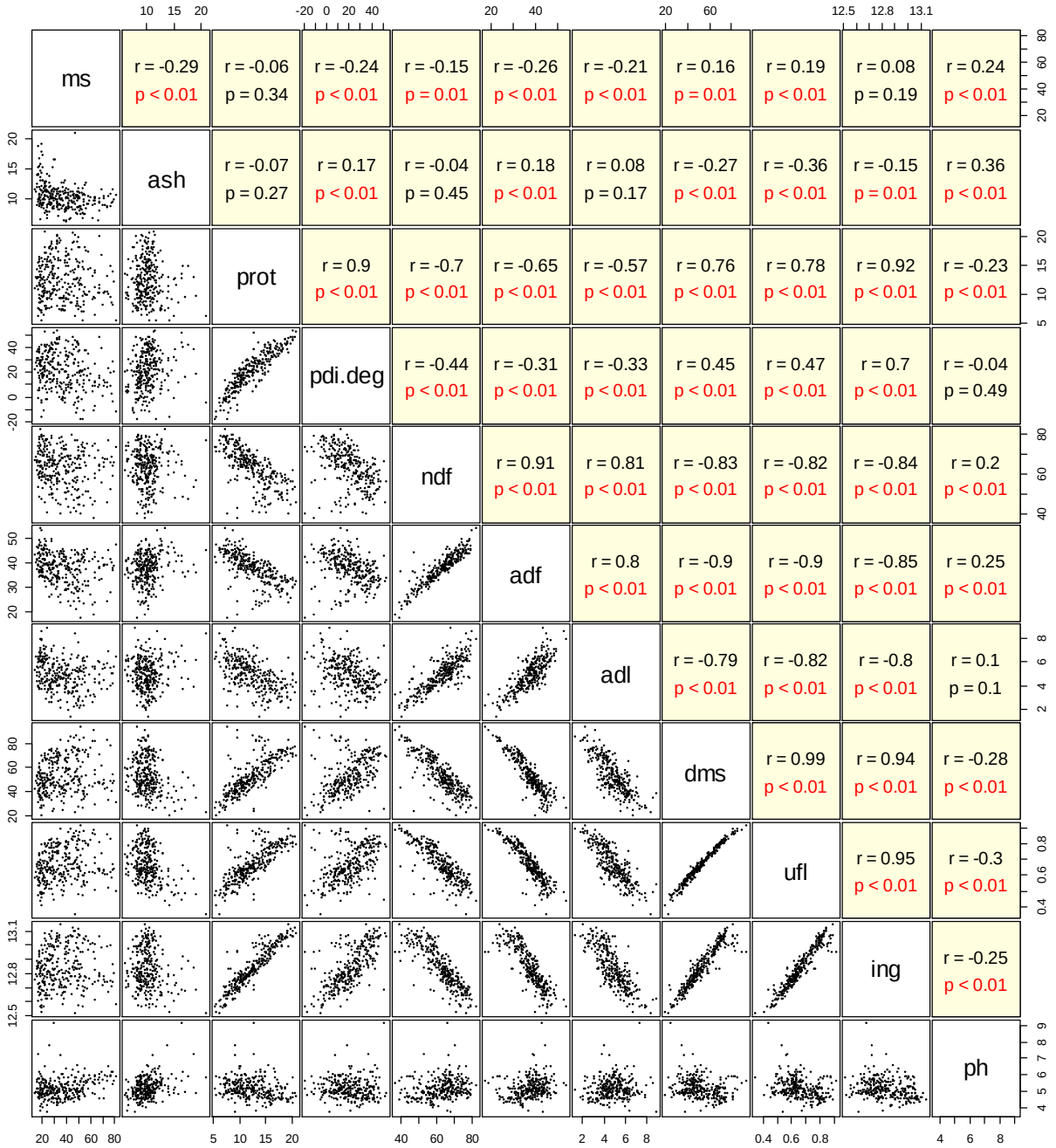

Figure 35 ***Examen des corrélations entre les variables à expliquer, deux à deux. Les corrélations significativement différentes de 0 sont en rouge.***

5.4.2. Résultats

- **Matière sèche**

Une procédure de sélection de variables basée sur le critère Akaiké (AIC) a permis de réduire le modèle à 4 variables ; le modèle s'écrit

MS = α*per + β*sta + γ*plu + δ*dur + ε

MS = $\hat{y} + \varepsilon$

α, β, γ, δ sont les coefficients du modèle

$\hat{y}$ le vecteur des valeurs prédites

et ε le vecteur « résidu ».

```
Call:
lm(formula = ms ~ per + sta + plu + dur, data = ensil.VA.VI)

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  32.2295     2.8967  11.126  < 2e-16 ***
per2         14.5527     1.8210   7.992 3.47e-14 ***
sta2         -6.4129     3.0481  -2.104  0.03628 *
sta3          2.0223     3.1874   0.634  0.52629
sta4         -3.7098     2.9546  -1.256  0.21030
plu2         -6.5185     2.4637  -2.646  0.00861 **
dur2         -0.5546     2.5146  -0.221  0.82560
dur3          4.4012     2.6407   1.667  0.09669 .
dur4          9.0981     2.1819   4.170 4.06e-05 ***
```

Rappel : interprétation d'une table issue d'un modèle linéaire

La valeur de l'intercept est la moyenne générale de la variable à expliquer (MS dans l'exemple ci-dessus) lorsque tous les facteurs (per, sta, plu et dur) sont fixés à 1 (leur modalité de référence, cad « 2011 », « feuille », « pas de pluie » et <= 6 heures », pour per, sta, plu et dur respectivement ;
*Puis, chacune des modalités différentes de la modalité de référence est comparée à la modalité de référence, les autres facteurs étant fixé à 1. Exemple : pour per2 (« 2012 »), on observe une augmentation (car le coefficient est positif) du taux de MS de 14.5527 points par rapport à per1 (« 2011 »), dont le taux de MS est de 32.2295% ; cela signifie que le taux de MS moyen des ensilages collectés en per1 = 32.2295 et le taux de MS moyen des ensilages collectés en per2 = 32.2295 + 14.5527 = 46.7822%, et ceci, lorsque tous les autres facteurs sont fixés à 1, c.a.d « feuille », « pas de pluie » et <= 6 heures », pour sta, plu et dur respectivement (on dit parfois, lorsque toute chose est égale par ailleurs). La table donne ainsi pour per2 le coefficient 14.5527, son écart type, 1.8210, la valeur du test t (test de student), 7.992, et le degré de significativité, 3.47e-14 *** ; cette dernière valeur signifie que la différence entre per2 et per1 (14.5527) est TRES significative, avec une valeur de p bien inférieure à 0.0001). La même démarche est appliquée à chacun des facteurs explicatifs.*

on tire de la table que

- per2 significativement > per1
- sta2 significativement < sta1 (mais pas sta3 et sta4 car p>0.1)
- plu2 significativement > plu1
- dur4 significativement > dur1 (mais pas dur 2 et dur3)

On calcule ensuite les valeurs prédites par le modèle, et leur moyenne pour les différentes modalités de facteurs (figure 36).

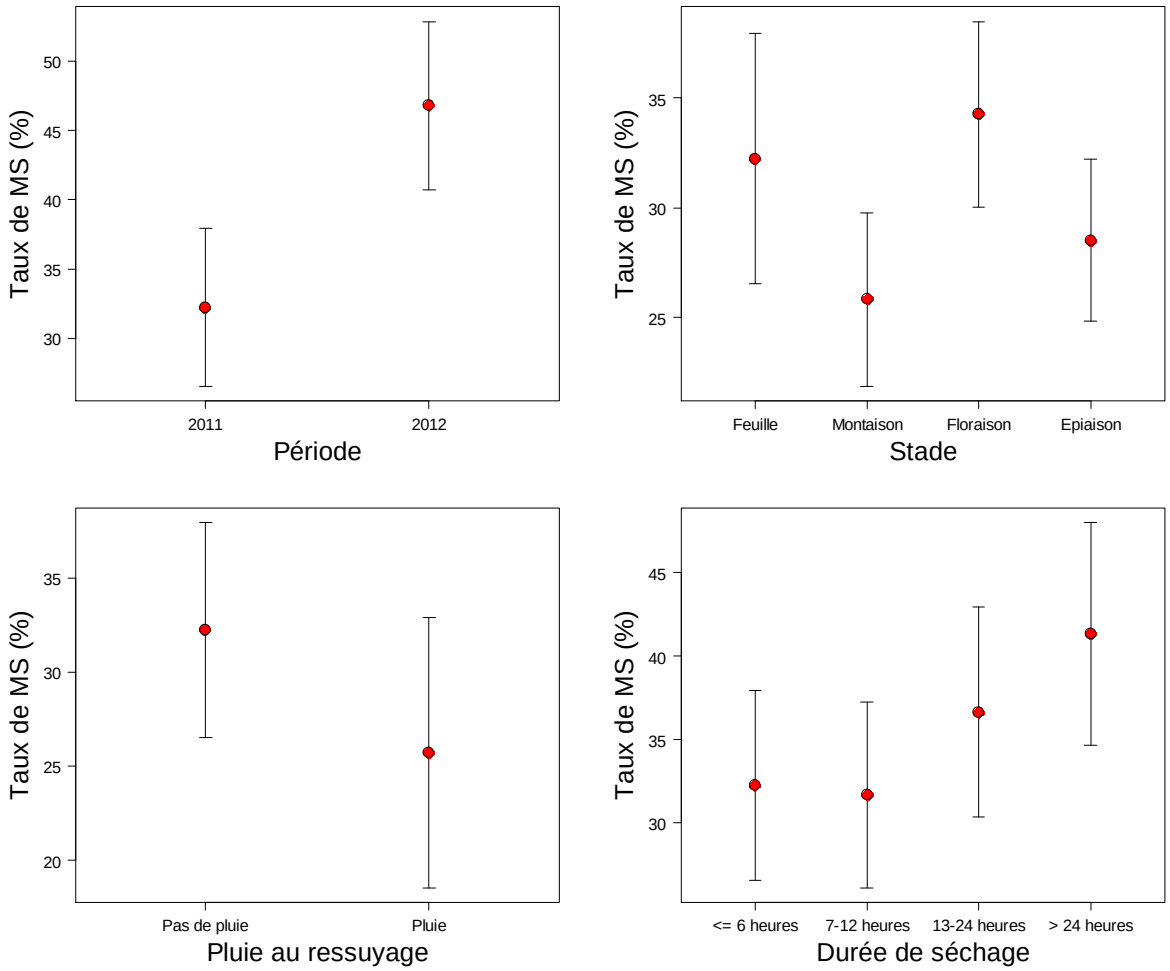

Figure 36 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)***

On voit ici clairement que le taux de MS est bien supérieur en 2012, la fauche ayant été effectuée en saison sèche. De plus, on observe que le stade influe aussi significativement sur le taux de MS, car on remarque que les fourrages fauchés aux stades « feuille » et « floraison » ont des meilleurs taux de MS que pour les autres stades. On note aussi que la météo et la durée de séchage jouent aussi un rôle important sur la Ms ; un temps sec au ressuyage ainsi qu'une dure de séchage de plus de 13, voire 24 h étant l'idéal.

- **Protéines**

Une procédure de sélection de variables basée sur le critère Akaiké (AIC) a permis de réduire le modèle à 6 variables ; le modèle s'écrit

PROT = α*fop + β*sta + γ*afo + δ*tap + η*min + λ*dur + ε

PROT = $\hat{y} + \varepsilon$

α, β, γ, δ, η et λ sont les coefficients du modèle

$\hat{y}$ le vecteur des valeurs prédites

et ε le vecteur « résidu ».

```
Call:
lm(formula = prot ~ fop + sta + afo + tap + min + dur, data = ensil.VA.VI)

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  11.5800     0.8413  13.764  < 2e-16 ***
fop2          2.5446     0.4506   5.647 4.05e-08 ***
sta2         -1.0961     0.6620  -1.656 0.098922 .
sta3         -1.8868     0.7184  -2.626 0.009110 **
sta4         -1.9576     0.6544  -2.992 0.003027 **
afo2          1.4654     0.4229   3.465 0.000614 ***
afo3          0.7212     0.5224   1.380 0.168560
tap2          1.6140     0.5583   2.891 0.004150 **
tap3          0.1430     0.6230   0.229 0.818671
min2          1.3798     0.4480   3.080 0.002278 **
min3          1.3048     0.4909   2.658 0.008320 **
dur2         -1.7451     0.5304  -3.290 0.001131 **
dur3         -1.2476     0.6106  -2.043 0.041984 *
dur4         -1.3354     0.4787  -2.789 0.005650 **
```

on tire de la table que

- fop2 significativement > fop1
- sta3 et sta4 significativement < sta1 (mais pas sta2)
- afo2 significativement > afo1 (mais pas afo3)
- tap2 significativement > tap1 (mais pas tap3)
- min2 et min3 significativement > min1
- dur2, dur3 et dur4 significativement < dur1

On calcule ensuite les valeurs prédites par le modèle, et leur moyenne pour les différentes modalités de facteurs (figure 37).

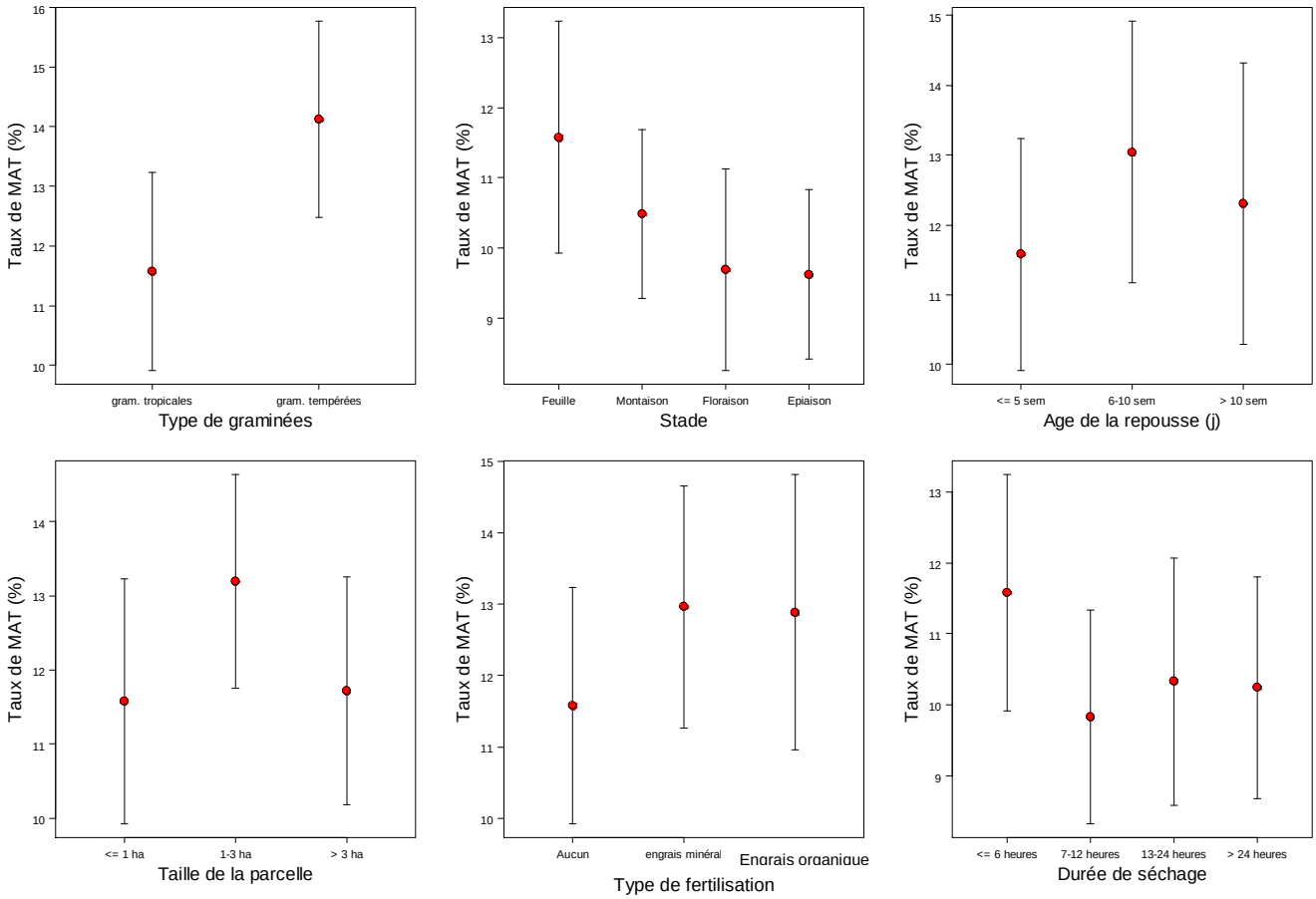

Figure 37 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)***

On note ici que 6 variables influencent le plus le taux de protéines au sein des ensilages. On remarque que les graminées tempérées sont de loin les plus riches en protéines, que plus un fourrage sera fauché jeune, plus celui-ci sera riche en protéines, qu'un âge de repousse de 5 à 10 semaines est l'optimum pour le taux de protéines, qu'au sein d'une parcelle de 1 à 3 ha on retrouve les fourrages les plus riches en protéines, que le fait de fertiliser la prairie (que l'engrais utilisé soit organique ou minéral) a un impact positif sur le taux de protéines, et enfin que la durée de séchage n'a que peu d'impact sur celui-ci ; un séchage de moins de 6 heures permettant d'augmenter ce taux légèrement.

- **UFL**

Une procédure de sélection de variables basée sur le critère Akaiké (AIC) a permis de réduire le modèle à 8 variables ; le modèle s'écrit

UFL = α*per + β*fop + γ*sta + δ*afo + η*tap + λ*min + ζ*plu + μ*dur + ε

UFL = $\hat{y}$ + ε

α, β, γ, δ, η, λ, ζ et μ sont les coefficients du modèle

$\hat{y}$ le vecteur des valeurs prédites

et ε le vecteur « résidu ».

```
Call:
lm(formula = ufl ~ per + fop + sta + afo + tap + min + plu + dur, data =
ensil.VA.VI)

Coefficients:
             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.650936   0.023438  27.772  < 2e-16 ***
per2         0.037375   0.011375   3.286 0.001150 **
fop2         0.094785   0.012400   7.644 3.57e-13 ***
sta2        -0.037772   0.017997  -2.099 0.036752 *
sta3        -0.051285   0.019590  -2.618 0.009339 **
sta4        -0.064595   0.017741  -3.641 0.000325 ***
afo2         0.030702   0.011905   2.579 0.010434 *
afo3         0.005038   0.014165   0.356 0.722379
tap2         0.032902   0.015217   2.162 0.031477 *
tap3        -0.008007   0.016873  -0.475 0.635502
min2         0.019048   0.012557   1.517 0.130426
min3         0.024845   0.013591   1.828 0.068625 .
plu2        -0.038334   0.014210  -2.698 0.007415 **
dur2        -0.049281   0.014494  -3.400 0.000774 ***
dur3        -0.025569   0.016658  -1.535 0.125942
dur4        -0.049967   0.013479  -3.707 0.000254 ***
```

on tire de la table que

- per2 significativement > per1
- fop2 significativement > fop1
- sta2, sta3 et sta4 significativement < sta1
- afo2 significativement > afo1 (mais pas afo3)
- tap2 significativement > tap1 (mais pas tap3)
- plu2 significativement < plu1
- dur2 et dur4 significativement < dur1 (et pas dur2)

On calcule ensuite les valeurs prédites par le modèle, et leur moyenne pour les différentes modalités de facteurs (figure 38).

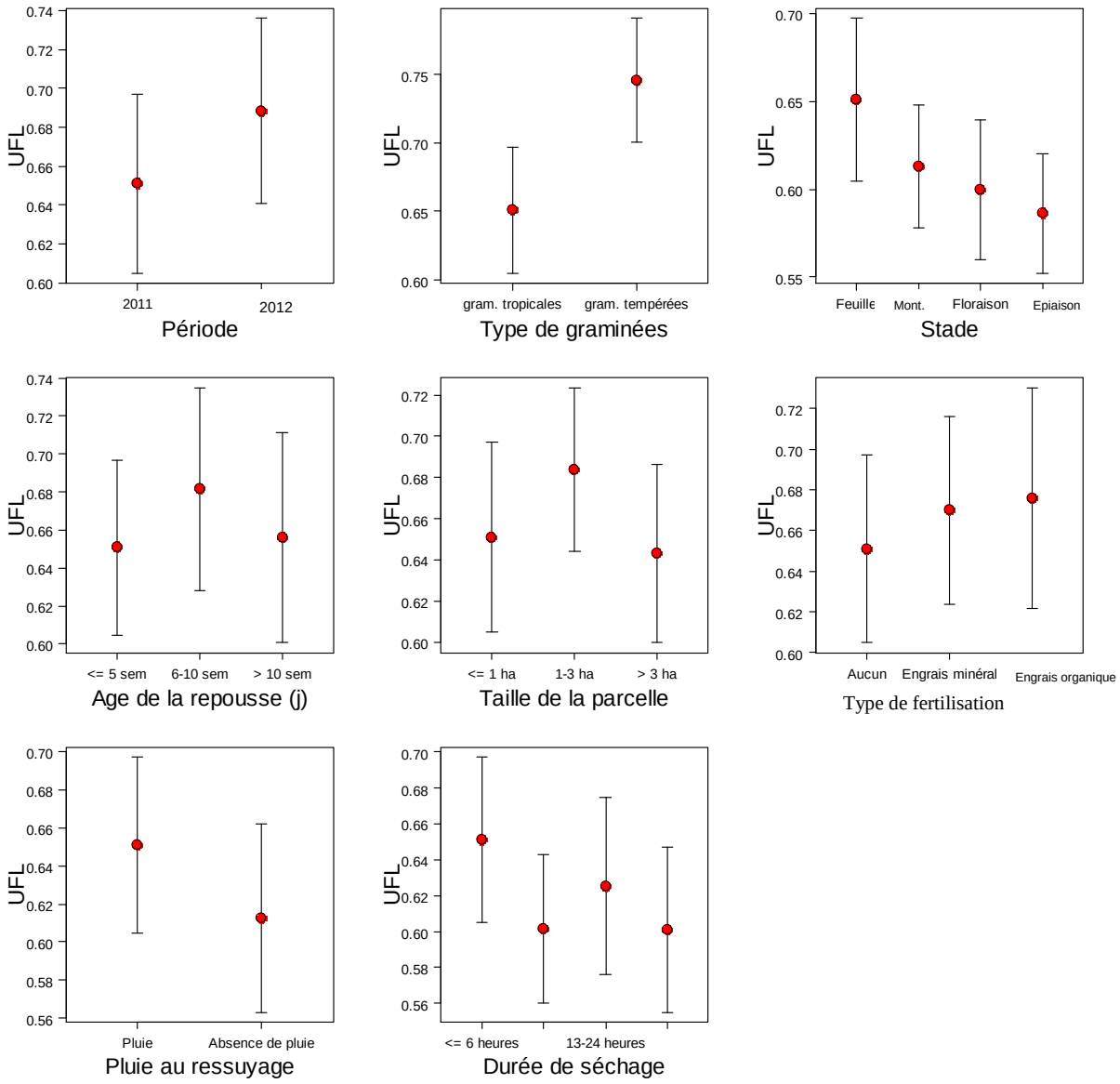

Figure 38 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)***

8 variables ont un impact significatif sur l'énergie contenue dans les ensilages. On remarque que le taux d'UFL est supérieur en 2012 qu'en 2011. Un fourrage récolté en saison sèche sera donc plus riche qu'en saison humide. Un fourrage issu de graminées tempérées sera beaucoup plus énergétique que s'il contenait des graminées tropicales. On note aussi que l'énergie de l'ensilage décroît en fonction du stade de récolte du fourrage (un fourrage récolté jeune sera plus énergétique que s'il est récolté mûr). Cela s'explique par le fait que plus l'herbe monte en graine plus l'énergie contenue dans celle-ci sera utilisée pour les semences et non plus pour la croissance des feuilles. On note également qu'un âge de repousse de 6 à 10 semaines ainsi qu'une parcelle de 1 à 3 ha paraît optimal pour un niveau énergétique maximal. On constate aussi qu'une prairie fertilisée, de préférence par un engrais organique, permet de réaliser un ensilage plus énergétique. Enfin on peut noter que la pluie au ressuyage ne change pas beaucoup le niveau d'énergie au sein d'un ensilage et qu'une durée de séchage inférieure à 6 heures est optimale pour un taux d'UFL maximum.

- **NDF**

Une procédure de sélection de variables basée sur le critère Akaiké (AIC) a permis de réduire le modèle à 6 variables ; le modèle s'écrit

UFL = α*per + β*fop + γ*sta + δ*afo + η*tap + λ*dur + ε

UFL = $\hat{y}$ + ε

α, β, γ, δ, η et λ sont les coefficients du modèle

$\hat{y}$ le vecteur des valeurs prédites

et ε le vecteur « résidu ».

```
Call:
lm(formula = ndf ~ per + fop + sta + afo + tap + dur, data = ensil.VA.VI)

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  66.5339     1.9170  34.708  < 2e-16 ***
per2         -7.0227     0.9178  -7.652 3.30e-13 ***
fop2         -5.7327     1.0267  -5.583 5.63e-08 ***
sta2          4.8570     1.5432   3.147 0.001827 **
sta3          5.7396     1.6835   3.409 0.000748 ***
sta4          6.7434     1.5161   4.448 1.26e-05 ***
afo2         -4.2547     1.0206  -4.169 4.10e-05 ***
afo3         -2.2231     1.2172  -1.827 0.068849 .
tap2         -3.4981     1.2929  -2.706 0.007241 **
tap3         -3.2455     1.4490  -2.240 0.025891 *
dur2          3.6193     1.2222   2.961 0.003330 **
dur3          3.0530     1.4105   2.164 0.031280 *
dur4          2.2813     1.1171   2.042 0.042091 *
```

on tire de la table que

- per2 significativement < per1
- fop2 significativement < fop1
- sta2, sta3 et sta4 significativement > sta1
- afo2 significativement < afo1 (mais pas afo3)
- tap2 et tap3 significativement < tap1
- dur2, dur3 et dur4 significativement > dur1

On calcule ensuite les valeurs prédites par le modèle, et leur moyenne pour les différentes modalités de facteurs (figure 39).

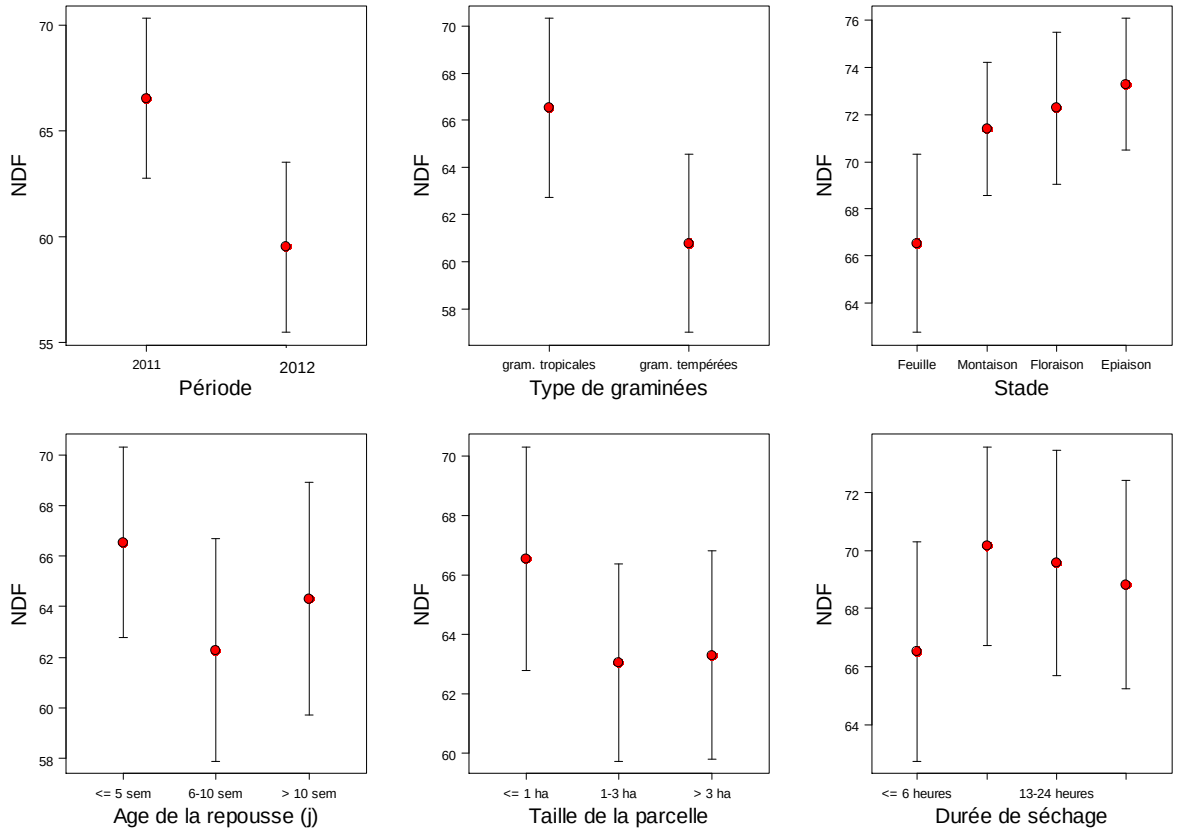

Figure 39 ***Moyenne des valeurs prédites par le modèle, pour chacune des modalités de chacun des facteurs (les autres facteurs étant fixés à 1)***

Pour les fibres, 6 variables ont un impact significatif. On voit que 2011 est l'année où les ensilages sont les plus fibreux, que les graminées tropicales ont la teneur en fibre la plus importante, que plus l'herbe est récoltée à un stade tardif, plus les fibres seront élevées, qu'un âge de repousse inférieur à 5 semaines ou supérieur à 10 semaines est l'idéal pour un taux de fibre maximal, et qu'une parcelle inférieur à 1 ha et qu'une durée de séchage autour de 6 à 24 heures permet d'obtenir le plus de fibres au sein d'un ensilage.
Il est important de signaler pour chaque facteur l'effet systématiquement inverse à celui observé à UFL et PROT ; on retrouve cela dans les analyses multidimensionnelles avec une opposition systématique d'UFL et PROT à NDF sur l'axe 1. Un taux énergétique et protéique élevé est donc lié à un taux de fibres faible et inversement.

5.4.3. Remarque

Ces analyses (modèles linéaires) abordent les variables à expliquer une à une et ne tiennent pas compte des corrélations entre ces variables. Or, celles-ci existent (figure suivante) : on peut voir ainsi une forte corrélation entre prot et pdi.deg, entre ndf et adf, entre dms, ufl et ing. L'ACPVI est donc l'analyse la plus complète de toutes, car elle prend en compte les corrélations entre variables à expliquer, les corrélations entre variables explicatives, et les liens entre ces 2 jeux de variables.

5.5. Discussion

A l'issue des 3 analyses statistiques précédentes, nous pouvons dégager une ligne directrice des meilleures pratiques agricoles dans le but d'obtenir un ensilage de qualité alimentaire mais aussi de conservation.

- **La période**

On retrouve dans les trois analyses le fait qu'en 2012 les ensilages étaient de meilleure qualité alimentaire et possédaient un meilleur taux de MS qu'en 2011. Le modèle linéaire nous montre qu'en 2012, on a observé une augmentation très significative ($p<0.0001$) de la MS de 14.5527 points par rapport à 2011. Pour les NDF et les UFL, on a respectivement perdu 7.02 points ($p<0.0001$) et gagné 0.3 points ($p<0.001$) en 2012. Cela peut s'expliquer par le fait que les ensilages de 2012 ont été réalisés en saison sèche, les conditions météo étant été meilleures pour la réalisation des ensilages. Les éleveurs n'ayant pas besoin d'attendre la fin de la pluie pour faucher, le stade de coupe peut aussi être mieux appréhendé. De plus, le soleil ayant été plus présent, l'herbe peut être mieux ressuyée en saison sèche.

- **Le stade de coupe**

On a remarqué que le stade auquel l'herbe a été coupée influait énormément sur la qualité alimentaire des ensilages. En effet, on voit que le taux de protéines perd respectivement 1.09 points au stade montaison, 1.88 points à la floraison et 1.96 points à l'épiaison par rapport au stade feuille, les degrés de significativité étant bon ($p<0.01$) sauf pour la montaison ($p<0.1$).
De même, pour l'énergie (UFL), on perd respectivement 0.34, 0.51 et 0.65 points ($p<0.01$) à chaque stade par rapport au stade « feuille ».
Pour les fibres au contraire, on gagne respectivement 4.86, 5.74 et 6.75 points ($p<0.001$) par rapport au stade de départ.
Cela peut être expliqué par le fait que plus un fourrage est fauché tard, plus l'énergie et les protéines vont être sollicitées afin de produire des semences pour la reproduction des graminées. Un fourrage vieux sera donc plus fibreux et contiendra moins de protéines et d'énergie.
Il est a noté qu'un compromis doit être recherché par l'éleveur, car un taux de fibres minimum est nécessaire aux bovins.
Les fibres stimulent l'activité masticatoire (déclenchement de la rumination) et la salivation des animaux. Les substances tampons contenues dans la salive permettent de lutter contre la baisse du pH dans la panse. Un PH trop faible conduit à une diminution du rapport C2/C3 pouvant provoquer une acidose. (Cournon, 2009). Selon Cournon, un taux de fibre de 55% est l'idéal pour un ensilage d'herbe. La moyenne des NDF étant de 66.5% pour les stades « feuille » et d'avantage pour les autres, il paraît judicieux de faucher de préférence au stade se rapprochant de la feuille.

- **Le fourrage**

Il paraît clairement dans les trois analyses que les graminées tempérées ont une meilleure qualité alimentaire et de conservation que les tropicales. On a vu avec l'ACP que le taux de MS d'un ensilage à base de kikuyu était moindre qu'avec les autres graminées. Il sèche donc moins facilement et l'éleveur doît donc en prendre compte.
En ce qui concerne les valeurs alimentaires, on voit que les graminées tempérées font gagner 2.5 points de protéines et 0.11 points d'énergie ($p<0.001$) et font perdre 5.7 points de fibres ($p<0.001$) par rapport aux graminées tropicales. On peut aussi noter que l'association RG /Dactyle et dans une moindre mesure le Brome est la plus favorable.

Ce phénomène est conforme aux faits avancés par la littérature, notamment par Paillat (2000) pour qui «la valeur de l'ensilage dépend en priorité de la valeur du fourrage vert récolté (espèce, stade) ». Les fourrages tropicaux ont des teneurs en constituants pariétaux (NDF) plus élevées que les fourrages tempérés (Archimede et al., 2009). A l'inverse les teneurs en matières azotées totales (MAT) sont plus faibles que celles des fourrages tempérés. Il s'agit donc de l'aptitude des fourrages à l'ensilage qui varie selon l'espèce.
Cependant, il est possible qu'en plus de la qualité nutritionnelle du fourrage à la fauche, l'espèce fourragère soit plus ou moins sensible aux fermentations (positives comme la fermentation lactique et négatives comme les fermentations butyriques ou acétiques) et donc aux dégradations des composants alimentaires. Il faudrait pour vérifier cela étudier l'effet de l'espèce fourragère sur la variation des produits issus des fermentations au sein de l'ensilage.

On voit également un effet non négligeable de l'âge de la repousse sur la qualité alimentaire et de conservation. On voit partout qu'une période de 6 à 10 semaines produirait un ensilage plus riche en protéines, en énergie et en MS qu'un fourrage encore jeune ou plus vieux.
Il en va de même avec l'âge de la prairie, celles de plus de 10 ans paraissant meilleures à la réalisation de bons ensilages.

- **La région**

On voit dans l'ACP réalisée que la région de la Plaine des Cafres se démarque nettement des autres, à la fois au niveau des valeurs alimentaires que de conservation. Au contraire la Plaine des palmistes est dans une moindre mesure la plus médiocre.

On peut penser que la météo en est le principal facteur (pluviométrie, insolation, températures extrêmes, humidité etc…). La Plaine des Palmistes étant une région très arrosée (plus de 4000 mm de pluie par an) et couverte, cette région étant la seule se situant sur le versant EST de l'île. Dans sa thèse, JM Paillat (2000), discute des particularités climatiques selon différentes régions de la Réunion. Il montre que la Plaine des Cafres possède des conditions potentiellement plus favorables au bon développement des espèces fourragères que la Plaine des Palmistes par exemple.

- **Le matériel utilisé**

Le type de matériel utilisé impacte significativement la qualité alimentaire et de conservation de l'ensilage. Selon l'ACP, l'utilisation d'une presse combinée augmenterait ces valeurs de qualité par rapport à une presse simple. Il en va de même pour la faucheuse conditionneuse qui serait meilleure que la faucheuse simple.
Dans le cas de la presse, une presse combinée emballe la balle directement après la presse alors qu'une presse simple nécessite l'intervention d'une enrubanneuse.
La balle aurait donc moins le temps de se réhumecter avec une presse combinée, ce qui expliquerait les différences de qualité obtenues.
En outre, Leclerc (2004) préconise l'application du film plastique directement après la confection de la balle pour une meilleure conservation de celle-ci. En effet, il indique que le maintient de la balle d'ensilage sur la face ronde alors qu'elle n'est pas enrubannée entraine une déformation de celle-ci et donc rend l'enrubannage plus difficile.

Concernant la faucheuse, l'utilisation d'une conditionneuse est plus favorable à un abaissement du pH. Conditionner les tiges signifie les écraser à l'aide d'un dispositif conditionneur qui peut se composer soit de 2 rouleaux nervurés qui plient et éclatent les tiges, soit d'un rotor à doigts qui happent le fourrage coupé et l'entraîne contre un peigne. Ceci entraine la libération des sucres solubles et favorise les fermentations lactiques.

En effet, une libération rapide des contenus cellulaires par le hachage ou la lacération du fourrage permet d'accélérer l'acidification (Gouet, 1979a *in* Paillat, 2000).

Concernant, la couleur de plastique utilisée, aucune tendance ne se dégage réellement, alors qu'un nombre de tours de plastique supérieur à 20, tours paraît nettement meilleur. Cela pouvant s'expliquer par le fait qu'avec au moins 20 tours, il y a moins de chance de faire pénétrer de l'air dans les balles.

- **La fertilisation**

La fertilisation influe surtout sur les valeurs nutritionnelles de l'ensilage. En effet, on voit qu'une fertilisation, qu'elle soit organique ou minérale permet une augmentation de 1.5 points ($p<0.01$) de protéines et de 0.3 points d'énergie ($p<0.1$). Quelque soit le type de fertilisation, les valeurs alimentaires sont plus favorables quand il y a eu une fertilisation préalable de la prairie. Jacobs et al (1998) et Keady et al (???) ont montré qu'un apport de fertilisation minérale azotée sur des prairies destinées à la production d'ensilage d'herbe avaient un effet positif sur l'énergie métabolisable et sur les protéines brutes.
Pour la fertilisation minérale on peut ajouter que 300 kg/ha minimums sont optimaux.

- **La météo durant le chantier**

La météo influence également beaucoup le taux de MS. On retrouve cela avec les modèles linéaires où la pluie au ressuyage fait perdre 6.6 points de MS ($p<0.01$). On retrouce aussi ces résultats sur l'ACP où chaque fois la variable « pas de pluie » et dirigée vers la MS. Cela était attendu car on sait que l'humidité trop importante d'un fourrage est préjudiciable à la réalisation d'un bon ensilage. Le taux de MS requis optimal étant de 35 à 40%.

- **Fanage/ séchage**

On voit qu'il est clair que la réalisation d'un fanage est meilleure pour la qualité d'un ensilage. On voit bien que la variable « fanage » est bien à gauche sur l'axe1.
En outre, on remarque avec les modèles linéaires qu'il est préférable de sécher le fourrage plus de 24 heures pour obtenir un taux de MS maximum. En effet sécher son fourrage plus de 24 heures permettrait de gagner 9.1 points de MS ($p<0.001$) en plus que s'il avait été séché moins de 6 heures.
L'effet de la durée de séchage sur le taux de MS n'est plus à prouver. Sous condition que celui-ci se déroule correctement (avec une météo qui n'est pas défavorable à la dessiccation du fourrage), le séchage permet d'augmenter la teneur en MS du fourrage fauché. Or, il a été montré que le séchage permet d'améliorer la conservation (Morgan et al., 1980, in : McDonald et al., 1991) : un fourrage humide nécessite une production d'acide lactique très importante pour être stabilisé et cette production nécessaire à la stabilisation diminue au fur et à mesure que la teneur en MS augmente (Wieringa, 1969, in : Demarquilly, 1979). Le préfanage permet en outre de réduire ou de supprimer totalement, selon le niveau de séchage, les pertes d'éléments nutritifs, (Paillat, 2000). On a donc logiquement une meilleure conservation de la qualité alimentaire du fourrage frais au cours du processus d'ensilage si la durée de ressuyage permet un séchage suffisant de l'herbe.

- **Le stockage des balles**

La durée de stockage joue sur le taux de MS et la qualité alimentaire. On voit avec l'ACP qu'une durée de stockage faible est meilleure pour la MS, mais moins bonne pour les valeurs alimentaires.
Au sein d'un silo, les pertes par jus interviennent principalement dans les premiers jours après l'enrubannage, elles disparaissent ensuite si l'ensilage présente une teneur en MS supérieure à 20 %, mais se maintiennent avec un faible débit sur une longue période pour les ensilages très humides (Bastiman, 1976, in Paillat, 2000). Le processus est identique au sein d'une balle ronde, mais les jus sont conservés au fond de la balle si le plastique est assez étanche.
On aura donc plus de MS mais moins de protéines et d'énergie en conservant un ensilage longtemps.
Les conditions de stockage ont un aussi un effet. En effet, l'adhérence du film à la balle est déterminante pour le maintient de l'étanchéité et donc la qualité des fermentations (Paillat, 2000). Le fait de conserver les balles empilées les unes sur les autres peut provoquer une modification de la forme de la balle et donc un décollement du plastique le long de l'ensilage. Cette perte d'étanchéité peut être à l'origine de la baisse des fermentations lactiques et donc le maintient de l'ensilage à un pH plus élevé.

5.6. Pratiques optimales pour la réalisation d'un ensilage

A l'aide des analyses précédemment établies, il est possible de combiner les modalités optimisant les qualités alimentaires et de conservation d'une balle ronde d'ensilage.

- Situation : Plaine des Cafres
- Période : Saison sèche
- Stade : Proche du stade « feuille »
- Matériel : Faucheuse conditionneuse + Presse combinée+ 20tours de plastique minimum
- Météo : Pas de pluie du début à la fin du chantier
- Fertilisation préalable : Organique ou minéral (autour de 300 kg/ha) sur prairie âgée de plus de 10 ans.
- Fourrage : RG / dactyle avec fanage et séchage de plus de 24 heures
- Stockage : Les unes à côtés des autres pendant 8 semaines
-

Grâce aux enquêtes récoltées on peut obtenir en comparaison ces valeurs :

MS = 50.2% ; pH = 4,45; proteines = 18.2 %; NDF = 42.3%; UFL = 0,92

Il s'agirait donc d'un ensilage de très bonne qualité selon les critères établis dans la bibliographie. En modifiant leurs pratiques, les éleveurs pourraient améliorer de 13 % à de 57 % les valeurs de leur ensilage, avec notamment une très grande marge de progression sur la valeur des protéines, de la MS et sur l'énergie (Tableau 11).

Tableau 11 Comparaison des valeurs retenues avec un éleveur dont les pratiques correspondent avec nos pratiques considérées comme optimale avec la moyenne des valeurs prédites par le FOSS des échantillons prélevés.

	Valeurs retenues par un éleveur se rapprochant des pratiques idéales	Moyenne des échantillons prélevés	Amélioration possible
MS	50,2	32,2	56%
pH	4,45	5,1	13%
Protéines	18,2	11,6	57%
NDF	42,3	66,5	37%
UFL	0,92	0,65	42%

Conclusion générale et perspectives

Ce travail qui liait à la fois calibration des spectromètres ainsi que la recherche des principaux facteurs associés à la qualité de l'ensilage à la Réunion par le biais d'enquêtes et d'analyses à nécessité un travail de terrain conséquent, à la fois pour ma part où 4 mois de terrain ont été nécessaire mais aussi pour mon prédécesseur. Ce travail couplé sur un an à donc permis d'établir une base de données solide liées à l'acquisition d'enquêtes et de prélèvements (près de 400 prélèvements ayant été réalisés auprès des 50 éleveurs retenus). De plus, le fait d'avoir réalisé ce travail sur un an a permis de bien appréhender les hétérogénéités liées au climat notamment, qui varie d'une saison à l'autre.
Ce travail n'a pas toujours été facile. Pour ma part, reprendre tous les éleveurs de la première étude n'a par exemple pas été possible en totalité, un décès d'éleveur ayant été signalé entre les deux études, et deux éleveurs n'ayant pas eu d'ensilage à disposition pendant la saison humide. 3 éleveurs n'ont donc pas pu être suivis pour l'étude de cette saison.
Aussi, on peut remarquer des points problématiques concernant les délais d'obtention de certains paramètres de qualité comme les acides gras volatils, les différentes formes d'azote ou les alcools qui nous aurait permis d'approfondir notre travail. Il en va de même pour la calibration du FOSS qui devra être réalisée ultérieurement pour les mêmes raisons de délais.
Concernant le protocole, il serait judicieux pour les prochaines études sur l'ensilage d'effectuer des prélèvements également en bas de la balle ronde, les jus s'y déposant naturellement par gravité, ce qui peut légèrement fausser les données de MS principalement.

Malgré ces quelques points négatifs, on peut faire ressortir un travail global satisfaisant et plutôt complet. Ce type de travail n'ayant pas encore été réalisé auparavant sur de l'ensilage frais, il sera donc de grande aide pour les éleveurs de la Réunion. Alors qu'auparavant, les éleveurs devaient attendre des semaines avant d'obtenir des résultats de leur ensilage, il sera maintenant possible de les avoir en direct avec les différents spectromètres. Cela sera aussi d'une grande utilité pour les techniciens qui suivent les éleveurs afin de pouvoir les conseiller en temps réel sur le choix d'alimentation des animaux (dose de compléments...).
Les enquêtes également seront très utiles aux éleveurs. En effet, malgré que les résultats finaux ne leur aient pas encore été communiqués, ils leur permettront de connaître les pratiques agricoles les plus optimales à l'obtention d'un ensilage de qualité sur leur île. Au-delà des 50 éleveurs enquêtés, l'ensemble des éleveurs de l'île pourra en être avisé, bien que des paramètres soient difficiles à respecter comme la météo ou la localisation des parcelles en particulier.

Bibliographie

AGORAH. 2006. Tache urbaine et espaces agricoles à la Réunion. Document de travail.

Adesogan, A. T., D. I. Givens, et E. Owen. 2000. « Composition and Nutritive Value in Forages ». *Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research*: 263-278.

Agreste. Beyond 20/20 WDS - Dossiers de rapports. http://agreste.maapar.lbn.fr/ReportFolders/ReportFolders.aspx.

Agri Analysis Inc. 2009. Feed and Forage Terminology and Definitions - quality testing laboratory evaluating farm animal forage and feed. http://www.agrianalysis.com/feed-and-forage-terminology.shtml.

Ampuero, S. 2008. « Détermination de la teneur en FIBRES dans les aliments pour animaux à ALP ». *Posieux, France□: Agroscope Liebefeld-Posieux (ALP).*

Andueza, D., M. Jestin, F. Picard, J.P. Andrieu, et R. Baumont. 2005. Estimation de la teneur en parois végétales totales (NDF) des fourrages à partir de la spectrométriedans le proche infra-rouge (SPIR). Renc. Rech. Ruminants, 12.

Andueza, D., F. Munoz, et A. Garrido. 2001. The prediction of the nutritive value of Mediterranean alfalfa forage by NIRS. Dans *Quality in Lucerne and medics for animal production. Proceedings of the XIV Eucarpia medicago spp-Group Meeting, Zaragoza and Lleida, Spain, September*, 12–15.

Aufrere, J., D. Graviou, C. Demarquilly, R. Verite, B. Michalet-Doreau, et P. Chapoutot. 1989. « Aliments concentrés pour ruminants□: prévision de la valeur azotée PDI à partir d'une méthodeenzymatique standardisée ». *INRA Prod. Anim* 2 (4): 249-254.

Aufrere, J., P. Pelletier, G. Brandon, A. Hardy, D. Andueza, J.P. Dulphy, et R. Baumont. 2006. Prévision de la digestibilité in vivo de la matière organique de foins de mélanges prairiaux par différentes méthodes de laboratoire. Renc. Rech. Ruminants, 13.

Ball, D. M., M. Collins, G. D. Lacefield, N. Martin, D. Mertens, K. Olson, D. Putnam, D. Undersander, et M. Wolf. 2001. « Understanding forage quality ». *American Farm Bureau Federation Publication*: 1-17.

Barbet-Massin, V., P. Grimaud, A. Michon, et P. Thomas. 2004. *Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion*. Plaine des Cafres□: UAFP, CIRAD Pôle Elevage.

Bertrand, D., et E. Dufour. 2006. *La spectroscopie infrarouge et ses applications analytiques, 2e édition*. Tec & Doc.

Blanfort, V. 2000. Le contexte écologique. Dans *L'élevage bovin à la Réunion□: Synthèse de quinze ans de recherche*, 19-34. Montpellier□: CIRAD.

Boessinger, M. 2009. Clés d'estimation de la valeur des fourrages. Agridea-Lindau.

De Boever, J. L., B. G. Cottyn, D. L. De Brabander, J. M. Vanacker, et C. V Boucqué. 1996. « Prediction of the feeding value of grass silages by chemical parameters, in vitro digestibility and near-infrared reflectance spectroscopy* 1 ». *Animal feed science and technology* 60 (1-2): 103–115.

Bruno-Soares, A. M, I. Murray, R. M Paterson, et J. M.F Abreu. 1998. « Use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the prediction of the chemical composition and nutritional attributes of green crop cereals ». *Animal feed science and technology* 75 (1): 15–25.

Chambre d'Agriculture de la Réunion. 2008. Les filières de production à la Réunion.

Choisis, J.P., J.P. Grimaud, V. Alary, E. Legendre, J. Lepetit, P. Thomas, V. Blanfort, E. Chia, et P. Lecomte. 2003. The cattle farming development in la Reunion requires nex forms of territorial coordination. Dans *Product quality based on local resources and its portential contribution to improved sustainability*. Benevento, Italie.

Choisis, J.P., P. Grimaud, C. Lassalle, et (Prénom). 2009. « Pratiques d'élevage dans les exploitations bovinesallaitantes conduites sur pâturage dans les Hauts de la Réunion ». *Inra Prod. Anim.* 22 (4): 345-354.

Chuenpreecha, T., et M. Odai. 2002. « Processing and Utilization of Small Round-Bale Wrapped Silage Made from Tropical Forages ». *JIRCAS Working Rep* (30): 173-178.

Cowan, M. 2000. Use of ensiled forages in large-scale animal production systems. Dans *Silage making in the tropics with particular emphasis on smallhloders*, 161:31-40. FAO Plant. Production and Protection Paper. L.t' Mannetje.

Cozzolino, D., Y. Acosta, et J. Garcia. 2009. Application of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to forage evaluation in Uruguay. Dans *INTERNATIONAL GRASSLANDS CONGRESS*. Vol. 19.

Deaville, E. R., et P. C. Flinn. 2000. « Near infrared (NIR) spectroscopy: an alternative approach for the estimation of forage quality and voluntary intake ». *Forage evaluation in ruminant nutrition*: 301–320.

Devimieux, T., A. Michon, Y. Evenat, J.L. Caminade, et J.G. Augé. 2000. Le contexte socio-économique. Dans *L'élevage bovin à la Réunion□: Synthèse de quinze ans de recherche*, 43-53. Montpellier□: CIRAD.

Galan, F., J.L. Reuillon, O. Letellier, S. Bleubar, et F. Marie. 2009. Caractérisation des systèmes d'élevage bovin des départements d'outre-mer (DOM). Premiers résultats issus des Réseaux de références. Renc. Rech. Ruminants, 16.

Garrido-Varo, A. 1997. « Current and future applications of NIRS technology in the feed industry ». *Options Mediter* 26: 87–92.

Grimaud, P., et P. Thomas. 2002. « Diversité des rations à base de graminées et gestion des prairies en élevage bovin sur l'île de la Réunion ». *Fourrages* 169: 65-78.

Hiep, T. 2008. Composition des régimes et efficiences zootechnique et environnementale dans les exploitations laitières tropicales (Vietnam et île de La Réunion). Renc. Rech. Ruminants, 15.

———. 2009. Qualification en spectrométrie infrarouge de l'azote et des fibres des ressources alimentaires et de leur utilisation digestive par le bétail laitier en milieux tropicaux (Réunion - Vitenam). Université de la Réunion.

INRA, Mise à jour 2010. 2007. *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments*. QUAE.

INSEE. 2008. *Tableau économique de La Réunion. Utilisation du sol et élevage*.

Kim, K.H., et S. Uchida. 1991. « Comparative studies of ensiling charcteristics between temperate and tropical species, 3: The effects of addition of glucose and formic acid on fermentation and proteolysis during ensilage ». *Journal of Japanese Society of Grassland Science* 37 (2): 253-260.

Laboratoire d' alimentation animale du Cirad. 2007. La spectroscopie dans le proche infrarouge.

Leclerc, G. 2004. « Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maitrise des risques sanitaires ». *AFSSA*.

Mandret, G. 2000. Les grandes mutations de la société réunionnaise. Dans *L'élevage bovin à la Réunion□: Synthèse de quinze ans de recherche*, 19-34. Montpellier□: CIRAD.

Mentink, R. L., P. C. Hoffman, et L. M. Bauman. 2006. « Utility of near-infrared reflectance spectroscopy to predict nutrient composition and in vitro digestibility of total mixed rations ». *Journal of dairy science* 89 (6): 2320–2326.

Naves, M., A. Lebon, et A. Collin. 2009. Analyse des effets du milieu sur les performances des bovins allaitants à l'île de la Réunion. Renc. Rech. Ruminants, 16.

Norris, K. H., R. F. Barnes, J. E. Moore, et J. S. Shenk. 1976. « Predicting Forage Quality by Infrared Replectance Spectroscopy ». *Journal of animal science* 43 (4): 889.

Oude Elferink, S., F. Driehuis, J.C. Gottschal, et S.F. Spoelstra. 2000. Silage fermentation processes and their manipulation. Dans *Silage making in the tropics with particular emphasis on smallhloders*, 161:17-30. FAO Plant. Production and Protection Paper. L.t' Mannetje.

Paillat, J.M. 1995. Etude de l'ensilage en balles enrubannées sous climat tropical d'altitude. Cas des fourrages tempérés et tropicaux récoltés à l'île de La Réunion. Thèse Dr INA, INA-PG, juin 23.

Paillat, J.M., P. Hassoun, J.Y. Latchimy, P. Brunschwig, et J. Lepetit. 2000. La constitution de réserves fourragères sous forme d'ensilage. Dans *L'élevage bovin à la Réunion□: Synthèse de quinze ans de recherche*, 177-207. Montpellier□: CIRAD.

Programme POSEI France. 2008. Résultats 2008 et estimation 2009 pour les exploitations bovins lait. Synthèse annuelle des données des réseaux d'élevage. Réseaux d'élevage pour le conseil et la prospective, Collection Résultats annuels.

———. 2009. Résultats technico-économiques des exploitations bovins lait du réseau de références de La réunion. Réseaux de référence, Collection résultats.

De Rouffignac, A., J.P. Choisis, et J.M. Salles. 2005. Enjeux des incitations économiques en élevage allaitant pour la gestion de la biodiversité dans les Hauts de la Réunion. Dans Bois Guillaume, France.

Sinnaeve, G., P. Dardenne, P. Agneessens, et R. Biston. 1994. « The use of near infrared spectroscopy for the analysis of fresh grass silage ». *J. Near Infrared Spectrosc.* (2): 79-84.

Stuth, J., A. Jama, et D. Tolleson. 2003. « Direct and indirect means of predicting forage quality through near infrared reflectance spectroscopy ». *Field Crops Research* 84 (1-2): 45–56.

Tillard, E. 2007. Approche globale des facteurs associés à l'infertilité et l'infécondité chez la vache laitière: imortance relative des facteurs nutritionnels et des troubles sanitaires dans les élevages de l'île de la Réunion. Université Montpellier II.

Titterton, M., et F. Bareeba. 2000. Grass and legume silages in the tropics. Dans *Silage making in the tropics with particular emphasis on smallhloders*, 161:43-50. FAO Plant. Production and Protection Paper. L.t' Mannetje.

Valdes, C., S. Andres, F.J. Giraldez, R. Garcia, et A. Calleja. 2006. « Potential use of visible and near infrared reflectance spectroscopy for the estimation of nitrogen fractions in forages harvested from permanent meadows ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86 (2): 308-314.

Table des annexes

Annexe 1 Enquêtes réalisées auprès des éleveurs 82
Annexe 2 Description de l'ensemble des variables explicatives concernant les enquêtes sur une année entière 85

Fiche observations : partie éleveur

N° chantier : surface parcelle : date :

1) INFORMATIONS ELEVEUR

Nom éleveur :
Région : [ ]Pl des Cafres [ ]Pl des palmistes [ ]Ouest [ ] Nord
[ ]Saint Joseph
Filière : [ ] Naisseur [ ] Engraisseur [ ] Laitier [ ] Mixte
Cheptel :
SAU :
Surface prairie : *Fauche : *Pâture :
Matériel possédé (oui ou non):
Tracteur :
Faneur :
Faucheuse : *Simple : *conditionneuse :
Presse : *Simple : *combinée :

Matériel : [ ]CUMA [ ]Propre matériel [ ]Entraide [ ]Prestation [ ] Autre

Hauteur coupe :

Fiche observations : partie chantier

N° chantier : surface parcelle : date :

1) FOURRAGE PARCELLE :

Type de fourrage : [ ] Brachiaria [ ] Chloris [ ] Kikuyu [ ] Setaria
[ ] Brome [ ] Ray Grass [ ] RG-Dactyle [ ] Drèche
[ ] Triticale [ ] Avoine [ ] Luzerne [ ] Autre
Mélange ? : Proportions :
Age prairie :
Age fourrage à la coupe :
Stade : [ ] Feuille [ ] Montaison [ ] Epiaison [ ] Liane/floraison

2) FERTILISATION PARCELLE :

Type de fertilisant	[ ] Organique	[ ] Minéral	[ ] Mixte
Nom			
Dose utilisée			
Date dernière F avant fauchage			

2) FAUCHE PARCELLE :

Date et heure fauche :
Date et heure fanage :
Date et heure endainage :
Date et heure pressage :
Largeur andain :
Hauteur coupe herbe :
Longueur hachage herbe :
Durée chantier :
Conditions météo (12h avant fauche) : [ ] pluie [ ] nuageux [ ] vent [ ] soleil
Météo durant la fauche : [ ] pluie [ ] nuageux [ ] vent [ ] soleil
Météo durant le fanage : [ ] pluie [ ] nuageux [ ] vent [ ] soleil

3) ADDITIFS :

Ajout d'additifs : [ ] Mélasse [ ] Conservateur [ ] Autre
Quantité :

5) Plastique :

Couleur : [ ] Noir [ ] Blanc [ ] Vert [ ] Autre
Nombre de tours de plastique :

Fiche observations : partie balle enrubannée

N° chantier : surface parcelle : date :

1) **Description balle :**

Tenue balle : [ ] ronde [ ] légèrement écrasée [ ] écrasée

Etat plastique : [ ] troué [ ] lacéré [ ] réparé [ ] bon

Moisissures : [ ] aucune [ ] peu nombreuses [ ] périphériques [ ] nombreuses [ ] intérieures

Humidité: [ ] jus [ ] très humide [ ] humide [ ] sec

Odeur : [ ] sans [ ] caramel [ ] tabac [ ] choucroute [ ] vinaigre [ ] rance [ ] pourriture

Texture : [ ] fourrage non dégradé [ ] dégradé aux extrémités [ ] feuilles fortement dégradées collantes [ ] feuilles + tiges fortement dégradées

2) **Stockage balle**

Temps pressage-stockage :

Conditions stockage : [ ] Bord de parcelle [ ] proximité étable [ ] empilé [ ] couché

Temps stockage :

Temps stockage-distribution :

Selon vous quelles seraient les améliorations à apporter pour obtenir un meilleur ensilage ?

Annexe 2 Description de l'ensemble des variables explicatives concernant les enquêtes sur une année entière

```
 four1      stade      pluie.nuit  meteo.fauche    pluie.ress pluie.press
Bra:25   feuille  : 34   NON:257     beau temps:180   NON:243     NON:253
Chl:70   montaison:104   OUI: 33     couvert   : 54   OUI: 47     OUI: 37
Kik:78   floraison: 59               venteux   : 15
Bro:24   epiaison : 93               pluie     : 41
Dac:30
RG :63

 duree.sechage      duree.stockage    fanage              periode
<= 6 heures :123    <= 30 j  : 48    Pas de fanage:192   2011:173
7-12 heures : 47    31 - 60 j:118    Fanage       : 98   2012:117
13-24 heures: 40    61-90 j  : 53
> 24 heures : 80    > 90 j   : 71

 zone                 filiere                    effectif               SAU
Pl. Cafres    :164   Laitier            :159   <= 40    : 62   <= 15 ha: 97
P¨l. Palmistes: 16   Naisseur           : 39   41 - 70 j:144   16-30 ha: 76
St Joseph     : 63   Naisseur-engraisseur: 33   > 71     : 84   > 30 ha :117
Nord-Ouest    : 47   Engraisseur        : 19
                     Mixte              : 40

 prai.fauche    faucheuse           faneur              presse
<= 8 ha:99    conditionneuse:181   faneur       :204   combinee     : 83
9-15 ha:94    simple        :109   pas de faneur: 86   presse simple:207
> 15 ha:97

 hachage                materiel        h.coupe      h.fauche    taille.parcelle
Pas de hachage:179   Agriculteur: 80   < 10 cm: 91   < 8h  : 69   <= 1 ha: 47
Hachage       :111   Echange    : 25   10 cm  :144   8h-10h:178   1-3 ha :143
                     Prestataire: 32   > 10 cm: 55   > 10h : 43   > 3 ha :100
                     CUMA       :153

 age.prairie         age.four      dose.min       ferti.org               dose.org
<= 5 ans:123   <= 5 sem:106   0 engrais:183   Aucun            : 97   0    :111
6-10 ans: 95   6-10 sem:118   < 300 kg : 60   Lisier           :163   <= 40:101
> 10 ans: 72   > 10 sem: 66   > 300 kg : 47   Fumier ou compost: 30   > 40 : 78

 couleur.pla   tours.pla     moisissures                odeur
Blanc: 23    <= 20:128   aucune    :259   sans odeur / choucroute / vinaigre:167
Noir :205    > 20 :162   moisissure: 31   Caramel / tabac / alcool          :103
Vert : 62                                 Rance / pourriture                : 20

 couleur                 texture                    note         stockage
jaune / vert:211   Feuille non degradée:264   Mauvais: 48   Pres de l'etable: 47
Brun / Noir : 79   Feuille dégradée    : 26   Moyen  :152   Bord de parcelle:243
                                              Bon    : 90

 cond.stockage           Type de fourrage
Empilees   : 28    Graminées tropicales:173
Côte à côte:262    Graminées tempérées :117
```