



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



CIHEAM

Trabajo Fin de Máster

Evaluación de la calidad de los recursos forrajeros
ingeridos por el ganado lechero a través del análisis
de heces con NIRS

Laurent BONNAL

Director: Denis BASTIANELLI

Facultad de Veterinaria

2017



UMR SELMET Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux
Laboratoire d'alimentation animale



Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (IAMZ)
Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos Mediterráneos (CIHEAM)

Universidad de Zaragoza

Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA)

MASTER INTERNACIONAL EN NUTRICION ANIMAL

Evaluation de la qualité des régimes alimentaires consommés par
les bovins sur parcours par l'analyse des fèces par SPIR

Laurent BONNAL

2017

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je souhaite remercier le CIRAD pour le financement de cette formation et le directeur de l'UMR SELMET, Alexandre Ickowicz pour m'avoir laissé le temps nécessaire à la réalisation de ce Master.

De même, je voudrais remercier Denis Bastianelli responsable du laboratoire d'alimentation animale de l'UMR SELMET, tuteur de ce travail de Master, pour sa confiance et son appui à la réalisation de travail de Master.

Une pensée particulière à Elodie Baby qui s'est retrouvée, malgré elle, à devoir gérer seule le laboratoire pendant la première année de ma formation.

Je voudrais également exprimer ma gratitude au personnel de l'IAMZ pour leur présence bienveillante pendant cette année de formation à Zaragoza et spécialement à Armando Occon Plazahola, coordinateur de la section de Production Animale pour le suivi de cette formation.

Je veux profiter de ce moment pour remercier mes compagnons d'aventure, Mounira, Rokia, Ramadan, Eslam, Salma, David, Loubna, Ibtissam, Carmen, Sandra, Noelia, Victor, Xavi, Rebeca, Naouel, Jihed, Nedra et Alaa et leur souhaiter réussite et bonheur pour la suite. Ce sera un plaisir de recroiser votre chemin.

Enfin, un remerciement tout particulier à mon épouse qui a dû supporter l'éloignement et le manque de disponibilité pendant ces deux années.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Table des matières	ii
Liste des tableaux.....	iv
Liste de graphiques	v
Liste des Abréviations	vi
Resumen.....	viii
Summary	ix
Résumé.....	x
1. Introduction.....	1
2. Etude bibliographique.....	2
2.1. La Spectrométrie dans le Proche Infrarouge.....	2
2.2. Intérêt de la SPIR pour évaluer la qualité des fourrages.....	4
2.3. Evaluation nutritionnelle en utilisant le spectre PIR des régimes.....	4
2.3.1. Composition chimique des régimes	4
2.3.2. Métabolites secondaires des plantes.....	4
2.3.3. Digestibilité et ingestion.....	5
2.4. Evaluation nutritionnelle en utilisant le spectre PIR des fèces.....	6
2.4.1. Composition chimique des fèces	6
2.4.2. Marqueurs fécaux	6
2.4.3. Composition chimique des régimes, digestibilité et ingestion volontaire.....	6
2.4.4. Composition botanique des régimes	8
3. Objectifs et contexte de l'étude.....	9
4. Matériels et méthodes.....	9
4.1. Description des jeux de données	9
4.1.1. Jeu de données : SEN01	10
4.1.2. Jeu de données : SEN02	10
4.1.3. Jeu de données : SEN03	12
4.1.4. Jeu de données : MAD01.....	12
4.1.5. Jeu de données : MAD02.....	13
4.1.6. Jeu de données : REU01 et VNM01.....	13
4.1.7. Jeu de données : GUY01.....	14

4.2. Méthodes d'analyses	14
4.2.1. Spectrométrie dans le proche infrarouge	14
4.2.2. Matière sèche et matière organique	15
4.2.3. Matière azotée totale.....	15
4.2.4. Constituants pariétaux (FDN, FDA, LDA).....	15
5. Résultats.....	15
5.1. Description de la base de données QualiFNIRS	15
5.1.1. Composition chimique	15
5.1.2. Données spectrales	17
5.2. Description des étalonnages SPIR QualiFNIRS	17
5.2.1. Description statistique des performances des étalonnages QualiFNIRS	17
5.2.2. Evaluation de la capacité d'extrapolation des étalonnages QualiFNIRS.....	20
5.2.3. Essais d'amélioration de la capacité d'extrapolation des étalonnages QualiFNIRS..	21
5.3. Exploration complémentaire de la base QualiFNIRS : prédiction de la composition botanique et de la proportion de concentré	24
6. Discussion et perspectives	27
7. Conclusions.....	30
8. Bibliographie	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description statistique des paramètres des différents jeux de données de QualiFNIRS.....	11
Tableau 2. Liste des différents spectromètres PIR utilisés pour l'acquisition des spectres de la base QualiFNIRS.....	14
Tableau 3. Description statistique du jeu de données QualiFNIRS.....	15
Tableau 4. Description statistique des étalonnages QualiFNIRS de prédiction de la composition chimique des régimes à partir des fèces.....	17
Tableau 5. Description statistique des prédictions de MAT et de FDA des régimes des différents jeux de données en conditions d'extrapolation à partir des fèces	20
Tableau 6. Comparaison des GH et NH du jeu de données REU01 avant et après enrichissement partiel de QualiFNIRS.....	22
Tableau 7. Comparaison des prédictions par SPIR fécale de MAT et de FDA des régimes du jeu de données REU01 avant et après enrichissement partiel de QualiFNIRS	23
Tableau 8. Description statistique des étalonnages QualiFNIRS de prédiction de la composition botanique et de la proportion de concentré des régimes à partir des fèces	25
Tableau 9. Description statistique des reconstitutions des rations avec les prédictions des différentes composantes des rations de la base QualiFNIRS	26

LISTE DE GRAPHIQUES

Figure 1. Histogrammes de distribution des paramètres de QualiFNIRS.....	16
Figure 2. Représentations graphiques de l'ACP pour les 3 premières composantes principales de la base QualiFNIRS	17
Figure 3. Régressions linéaires entre les valeurs prédites à partir des fèces par SPIR et les valeurs de référence pour les paramètres MO, MAT, FDN, FDA et LDA des régimes	18
Figure 4. Histogrammes de distribution des GH et NH du jeu de données REU01 par rapport à la base QualiFNIRS avant et après enrichissement partiel	22
Figure 5. Régressions linéaires entre les valeurs prédites par SPIR fécale et les valeurs de référence des MAT et FDA des régimes pour REU01 avant et après enrichissement partiel	24
Figure 6. Régressions linéaires entre les valeurs prédites par SPIR fécale et les valeurs mesurées des pourcentages de graminées, de légumineuses, de ligneux/plantes arbustives et de concentré dans les régimes.....	25
Figure 7. Représentation graphique de la répartition des pourcentages de ration reconstituée par la somme des prédictions des différentes composantes de la ration.....	26

LISTE DES ABREVIATIONS

ABT	Alimentation du bétail tropical (programme de recherche)
ACP	Analyse en composantes principales
ADF	<i>Acid detergent fiber</i>
ADL	<i>Acid detergent lignin</i>
AFNOR	Association française de normalisation
AIEA	Agence internationale à l'énergie atomique
CARPAGG	CARbone des PAturages de Guyane et Gaz à effet de serre (programme de recherche)
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CP	Composante principale
DM	<i>Dry matter</i>
dMO	Digestibilité <i>in vivo</i> de la matière organique
dMS	Digestibilité <i>in vivo</i> de la matière sèche
FAD	<u>Fibra ácido detergente</u>
FDA	Fibres au détergent acide
FDArat	Fibres au détergent acide de la ration
FDN	Fibres au détergent neutre
FDNrat	Fibres au détergent neutre de la ration
FIFAMANOR	Centre de développement rural et de recherche appliquée (Madagascar)
FND	<u>Fibra neutro detergente</u>
IFDN	Fibres au détergent neutre indigestibles
INRA	Institut national de la recherche agronomique
ISRA	Institut Sénégalais de recherche agricole
IVDMS	Digestibilité <i>in vitro</i> de la matière sèche
LAD	<u>Lignina ácido detergente</u>
LDA	Lignine au détergent acide
LDArat	Lignine au détergent acide de la ration
LDB	Laiterie du berger (Richard Toll – Sénégal)
LNERV	Laboratoire national d'élevage et de recherches vétérinaire
LO	Longueur d'onde

MAT	Matière azotée totale
MATrat	Matière azotée totale de la ration
MO	Matière organique - <u>Materia orgánica</u>
MOrat	Matière organique de la ration
MOVI	Matière organique volontairement ingérée
MS	Matière sèche - <u>Materia seca</u>
MSP	Métabolites secondaires des plantes
MSVI075	Matière sèche ingérée par kg de poids métabolique
NDF	<i>Neutral detergent fiber</i>
NIR	<i>Near infrared</i>
NIRS	<i>Near infrared spectrometry</i> - <u>Espectrometría en el infrarrojo cercano</u>
OM	<i>Organic matter</i>
PB	<u>Proteína bruta</u>
PIR	Proche infrarouge
SEC	<i>Standard error of calibration</i> - Ecart-type résiduel de l'étalonnage
SECV	<i>Standard error of cross validation</i> - Ecart-type résiduel de la validation croisée
SEL	<i>Standard error of laboratory</i> - Ecart-type résiduel du laboratoire
SELMET	Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux
SEP	<i>Standard error of prediction</i> - Ecart-type résiduel de validation
SPIR	Spectrométrie dans le proche infrarouge
UMR	Unité mixte de recherche
URZ	Unité de recherches zootechniques (INRA Guadeloupe)

RESUMEN

Poder evaluar la calidad de las dietas (composición, valor nutritivo) ingeridas por el ganado bovino en pastos nativos o cultivados es particularmente importante para optimizar el nivel de producción de las explotaciones. En pasto o en pastoreo extensivo, es difícil saber con precisión las características de la ingesta de los rumiantes sin métodos experimentales pesados y costosos.

La espectrometría en el infrarrojo cercano (NIRS) es una herramienta rápida para el análisis directo de los recursos de alimentación del ganado, incluidos el forraje. La NIRS ha demostrado su potencial para la evaluación indirecta de la calidad de las raciones por análisis fecal.

Este trabajo de Máster tiene como objetivo poner a prueba la aplicación del NIRS fecal para evaluar la calidad de las dietas consumidas por el ganado bovino en pastoreo, en diferentes terrenos de investigación del CIRAD, mediante la movilización de diversos conjuntos de datos existentes en la unidad SELMET y la adición de nuevos datos recogidos en este estudio en Madagascar y Senegal para agregar variabilidad.

Un total de 8 conjuntos de datos constituidos de 1471 muestras de parejas dieta: heces han sido agrupados para formar la base de datos QualiFNIRS. Todas las muestras recogidas se analizaron químicamente por la materia orgánica (MO), la proteína bruta (PB), los constituyentes de la pared celular (FND, FAD, LAD) y todos los espectros NIR se han normalizado para un espectrómetro de Foss NIRSystem5000.

Las calibraciones desarrolladas han demostrado unos rendimientos aceptables con SEC (desviación residual estándar de la calibración) y R^2_{cal} de 1,14%MS y 0,97 para la MO, 1,42%MS y 0,87 para las PB, 4,31%MS y 0,88 para las FND, 2,41%MS y 0,86 para las FAD y 0,6%MS y 0,80 para la LAD. Sin embargo, a pesar que los rendimientos de las calibraciones son aceptables hemos podido demostrar la falta de robustez y la importancia de añadir periódicamente nuevos conjuntos de datos para aumentar la variabilidad de la base y mejorar su robustez. Las primeras pruebas exploratorias han demostrado también el potencial de la base QualiFNIRS para predecir la composición botánica y la proporción de concentrado de las dietas ingeridas.

Este trabajo ha permitido empezar a crear la base QualiFNIRS que podrá ser utilizada como una herramienta para la toma de decisiones por parte de los investigadores de SELMET en sus campos de investigación.

SUMMARY

Evaluate the quality of the diets (composition, nutritive value) ingested by cattle on native or cultivated pastures is important to optimize the level of production of the farms. On rangeland or in extensive pastures, it is difficult to know precisely the characteristics of ruminant intake without difficult and costly experimental methods.

Near infrared spectrometry (NIRS) is a rapid tool for direct analysis of the feeding resources of livestock and especially forages, which has shown its potential for indirect evaluation of diet quality through fecal analysis.

The objective of this study is to test the implementation of fecal NIRS to evaluate the diet quality consumed by cattle on rangelands and on various CIRAD research fields, by mobilizing various data sets existing in the SELMET unit and adding new data collected in this study from Madagascar and Senegal to add variability.

A total of 8 datasets with 1471 samples of diet: feces pairs could be grouped together to form the QualiFNIRS database. All collected samples were chemically analyzed for organic matter (OM), protein and parietal constituents (NDF, ADF, ADL). All NIR spectra were standardized for a Foss NIRSystem5000 spectrometer.

Calibrations developed have shown acceptable performances with SEC (standard error of calibration) and R^2_{cal} of 1.14%DM and 0.97 for OM, 1.42%DM and 0.87 for Protein, 4.31%DM and 0.88 for NDF, 2.41%DM and 0.86 for ADF and 0.6%DM and 0.80 for ADL, respectively. However, although the performances of the calibrations was acceptable, we were able to show that they lacked robustness and that it was important to be able to regularly add new datasets to increase the variability of the database and improve the robustness. Initial exploratory trials have also shown the potential of the QualiFNIRS database to predict the botanical composition and the proportion of concentrate of diets.

This work has made it possible to start the creation of the QualiFNIRS database, which can be used as a decision-making tool by SELMET agents on their research fields.

RESUME

Pouvoir évaluer la qualité des régimes (composition, valeur nutritive) ingérés par les bovins sur pâturages natifs ou cultivés est particulièrement important pour optimiser le niveau de production des exploitations. Sur parcours ou dans des pâturages extensifs, il est difficile de connaître avec précision les caractéristiques de l'ingestion des ruminants sans des méthodes expérimentales lourdes et coûteuses.

La spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) est un outil rapide d'analyse directe des ressources alimentaires du bétail et notamment des fourrages qui a montré son potentiel pour l'évaluation indirecte de la qualité des rations par l'analyse des fèces.

Ce travail de Master a pour objectif de tester la mise en œuvre de la SPIR fécale pour évaluer la qualité des régimes consommés par les bovins sur parcours et sur différents terrains de recherche du CIRAD, en mobilisant divers jeux de données existant dans l'unité SELMET et en y ajoutant de nouvelles données collectées dans le cadre de cette étude à Madagascar et au Sénégal pour ajouter de la variabilité.

Un total de 8 jeux de données constitué de 1471 échantillons de couples régime : fèces a pu être regroupé pour former la base de données QualiFNIRS. Tous les échantillons collectés ont été analysés chimiquement pour la matière organique (MO), la matière azotée totale (MAT) et les constituants pariétaux (FDN, FDA, LDA) et tous les spectres PIR ont été standardisés pour un spectromètre Foss NIRSystem5000.

Les étalonnages développés ont montrés des performances acceptables avec respectivement des SEC (écart-type résiduel de l'étalonnage) et des R^2_{cal} de 1.14%MS et 0.97 pour les MO, 1.42%MS et 0.87 pour les MAT, 4.31%MS et 0.88 pour les FDN, 2.41%MS et 0.86 pour les FDA et 0.6%MS et 0.80 pour les LDA. Cependant, bien que les performances des étalonnages soient acceptables nous avons pu montrer qu'ils manquaient de robustesse et qu'il était important de pouvoir ajouter régulièrement de nouveaux jeux de données pour augmenter la variabilité de la base et améliorer cette robustesse. Des premiers essais exploratoires ont pu montrer également le potentiel de la base QualiFNIRS pour prédire la composition botanique et la proportion de concentré des régimes ingérés.

Ce travail a permis de démarrer la création de la base QualiFNIRS qui pourra être utilisée comme outil d'aide à la décision par les agents SELMET sur leurs terrains de recherche.

1. INTRODUCTION

Connaître la qualité des régimes ingérés par les animaux d'élevage est particulièrement important pour maîtriser le niveau de production des exploitations et optimiser le rationnement pour une meilleure efficacité du système d'alimentation.

Si la qualité et la quantité des régimes sont relativement faciles à évaluer en stabulation, elles sont beaucoup plus difficiles à appréhender dans des systèmes extensifs en libre pâture où elles vont nécessiter de mettre en œuvre des méthodes lourdes, longues et onéreuses pour connaître avec précision les caractéristiques de l'ingestion des ruminants.

De plus, la capacité de sélection des aliments des ruminants sur parcours rend difficile la collecte d'échantillons de fourrages représentatifs des régimes ingérés réellement par les animaux, spécialement dans des systèmes de pâturages extensifs.

Cependant, la composition chimique des résidus non digérés des ressources fourragères consommées est susceptible d'être corrélée aux caractéristiques des fourrages ingérés ce qui implique que les fèces doivent contenir des informations sur les caractéristiques des régimes ingérés (Coleman *et al.*, 1995). Donc, l'analyse des fèces est potentiellement un bon moyen pour estimer les caractéristiques des régimes ingérés.

De nombreuses études ont montré que l'utilisation de la spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) pouvait être une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles de mesure directe de la valeur nutritive des fourrages et des concentrés. Son application sur les fèces, la SPIR fécale, a été testée pour prédire de nombreux paramètres tels que la composition chimique des fèces, des marqueurs fécaux, la digestibilité des fourrages ou la composition botanique des régimes (Dixon and Coates, 2009).

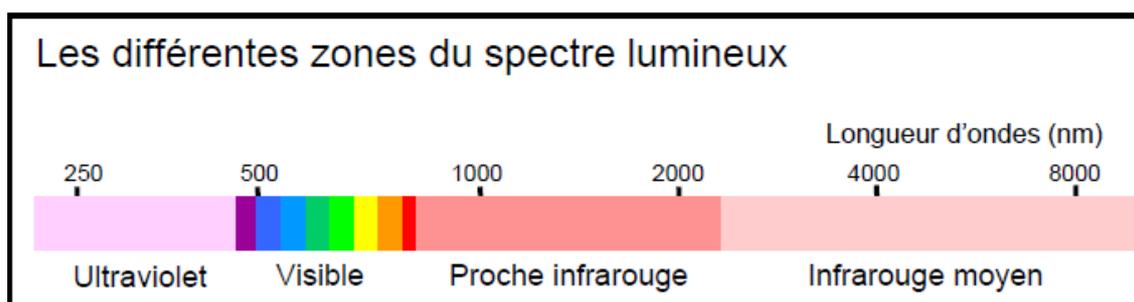
Cette étude vise à tester la mise en œuvre de la SPIR fécale pour estimer la qualité des régimes ingérés par des bovins sur pâturages natifs ou cultivés, sur des terrains de recherches du CIRAD, en appui à des études à Madagascar et au Sénégal. Pour cela, des données d'études antérieures, réalisées notamment à la Réunion, au Vietnam, au Sénégal et en Guyane, disponibles dans l'unité de recherche SELMET seront mobilisées et viendront compléter les collectes réalisées dans le cadre de ce stage de Master.

2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. LA SPECTROMETRIE DANS LE PROCHE INFRAROUGE

La spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) est une technique analytique physico-chimique basée sur le principe d'absorption des rayonnements infrarouges par la matière organique. Cette absorption étant liée à la composition chimique des échantillons, on peut estimer cette dernière par la simple mesure de l'absorption de la lumière par l'échantillon.

La mesure se fait avec un spectrophotomètre soit en transmittance si la lumière traverse l'échantillon, soit en réflectance si la lumière ne peut traverser l'échantillon car il est épais ou opaque. La région du proche infrarouge couvre la plage de longueurs d'ondes de la lumière comprise entre 800 et 2500 nm.



©Laboratoire d'alimentation animale, Cirad, 2007

Cette technique présente de nombreux avantages tels que :

- I) La rapidité, quelques secondes ou minutes suffisent pour recueillir le spectre d'absorption d'un échantillon qui servira à la prédiction de sa composition. A comparer avec la longue durée d'une analyse de composition chimique.
- II) Elle est non destructive et l'échantillon peut être récupéré intact après analyse. Cette propriété est particulièrement importante pour les échantillons en très faible quantité ou que l'on doit conserver pour des analyses ultérieures.
- III) Elle ne nécessite pas ou peu de préparation de l'échantillon préalable à la mesure.
- IV) Il n'y a pas besoin de réactifs chimiques et elle ne génère pas de déchets.
- V) Elle est peu coûteuse à l'usage, mais l'investissement initial pour l'achat du spectromètre et la construction des étalonnages pour chaque produit est conséquent.

Elle a cependant aussi des limites. La SPIR ne peut généralement pas être utilisée pour estimer des substances minérales car elle est basée sur l'absorption du rayonnement infrarouge par les molécules organiques et 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 (SELMET, 2007).

La SPIR est une technique d'analyse indirecte, ce qui signifie qu'elle nécessite une phase d'étalonnage basée sur des mesures de référence obtenues au laboratoire (par exemple la composition chimique) et l'établissement des modèles mathématiques qui permettront de relier le spectre infrarouge aux résultats de ces mesures.

En théorie, dans des conditions idéales, la SPIR correspond à une mesure d'une solution transparente et peu concentrée et c'est donc la loi de Beer-Lambert qui s'applique à chaque longueur d'onde du spectre proche infrarouge, loi qui relie directement l'absorbance mesurée à la concentration du composé recherché. En pratique, la SPIR est rarement utilisée dans des conditions idéales car elle est principalement utilisée pour prédire des produits bruts, ce qui implique que le spectre mesuré contient une information complexe, compte tenu des divers composés présents dans l'échantillon, à laquelle s'ajoutent des facteurs de variations perturbateurs « bruits » tels que la température ou la granulométrie. Pour éliminer ou atténuer ces effets et extraire l'information pertinente pour établir les étalonnages, des prétraitements mathématiques sont en général appliqués. Les prétraitements les plus couramment utilisés sont des dérivés, des lissages polynomiaux ou des méthodes de réduction de lignes de base.

Un étalonnage est une régression linéaire entre les caractéristiques d'un échantillon (composition chimique par exemple) et l'information spectrale. Dans notre cas, les modèles d'étalonnages sont obtenus par la méthode de régression multivariée des moindres carrés (Wold *et al.*, 1984) en utilisant la procédure mPLS du logiciel WinISI (version 4 ; Infracsoft International, Port Matilda, PA, USA). Pendant le processus de développement, les critères statistiques qui permettent d'évaluer la qualité des modèles sont le R^2_{cal} et le SEC (écart-type résiduel de l'étalonnage) pendant la phase d'étalonnage et le R^2_{cv} et le SECV (écart-type résiduel de la validation croisée) pendant la phase de validation croisée.

Comme tout modèle mathématique après avoir été évalué, un étalonnage doit être validé en testant sa capacité de prédiction. La validation consiste à prédire un jeu de données indépendant (différent du jeu de données qui sert à l'étalonnage) ce qui permet d'obtenir un R^2_{val} et un SEP (écart-type résiduel de validation). La régression linéaire entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites est décrite par une pente et un biais.

De manière générale, les écart-types (SEC, SECV ou SEP) doivent être les plus petits possibles. En pratique, le SEC doit donc être le plus petit possible et le plus proche possible de la répétabilité de l'analyse de référence soit le SEL (écart-type résiduel du laboratoire). Les SECV et SEP doivent être les plus petits possibles et les plus proches possible du SEC.

Comme toutes les techniques d'analyses, un critère essentiel à prendre en compte est la précision. Un étalonnage SPIR sera considéré comme optimal si la prédiction du paramètre à déterminer se fait avec une erreur du même ordre que celle obtenue avec la méthode d'analyse qui est utilisée pour obtenir la valeur de référence (Landau *et al.*, 2006).

En SPIR, les étalonnages ne peuvent pas être utilisés en extrapolation ce qui signifie que la base spectrale qui sert à construire les étalonnages doit être de même nature que les échantillons que l'on souhaite prédire. Pour juger de la pertinence d'un modèle pour prédire un jeu d'échantillons, deux distances statistiques seront utilisées. La distance H (distance de Mahalanobis) qui donnent la distance de chaque échantillon par rapport à l'échantillon moyen de la base d'étalonnage. Elle est notée GH avec le logiciel WinISI. Une bonne limite pour le GH est de 3.

La deuxième distance est le NH (Neighborhood H). Elle est utilisée pour contrôler la proximité des échantillons au sein de la base d'étalonnage et donne donc la distance de chaque échantillon par rapport à son plus proche voisin dans la base d'étalonnage. Une bonne limite pour le NH est de 0.6.

2.2. INTERET DE LA SPIR POUR EVALUER LA QUALITE DES FOURRAGES

Traditionnellement les méthodes d'analyses chimiques qui permettent d'évaluer la qualité d'un fourrage telles que la détermination de la matière azotée totale (MAT), les fibres au détergent neutre (FDN) ou les fibres au détergent acide (FDA) sont coûteuses et longues à mettre en œuvre.

La spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) est une méthode rapide qui grâce au développement de l'informatique, aux avancées technologiques des spectromètres et des méthodes d'analyses chimiométriques, s'est fortement développée et a su s'imposer comme une alternative intéressante aux méthodes d'analyses chimiques traditionnelles.

Les différents avantages de la SPIR en font une technique qui permet une application à des grands lots d'échantillons. Batten (1998) détaille dans ses travaux tous les avantages et limites de l'utilisation de la SPIR pour l'analyse des plantes.

2.3. EVALUATION NUTRITIONNELLE EN UTILISANT LE SPECTRE PIR DES REGIMES

2.3.1. Composition chimique des régimes

La SPIR a été très largement utilisée pour l'analyse de la composition des aliments du bétail et notamment des fourrages depuis les travaux de Norris (1976) considérés comme étant les premiers à évaluer la qualité des fourrages par SPIR. Les paramètres les plus prédits étant les MAT, FDN, FDA et les digestibilités *in vitro* de la matière sèche (IVDMS).

Ces études ont été appliquées d'une part à une large variété de ressources fourragères en sec, comme les fourrages, les ensilages (De Boever *et al.*, 1996) ou les feuilles d'arbres et d'arbustes (Meuret *et al.*, 1993) ou en frais sur des ensilages (Sinnaeve *et al.*, 1994; Cozzolino and Labandera, 2002) ou des fourrages (Lecomte *et al.*, 1996) et d'autre part, à de nombreuses espèces animales de ruminants ou de monogastriques (Aufrère *et al.*, 1996; Bastianelli *et al.*, 2007) ou même de carnivores tels que les visons (White and Rouvinen-Watt, 2004).

2.3.2. Métabolites secondaires des plantes

Les légumineuses fourragères ou les arbustes fourragers sont des ressources alimentaires très importantes dans de nombreuses régions du monde comme sources de protéines et de biomasse consommable par le bétail notamment en période sèche.

La présence de métabolites secondaires tels que les tannins dans ces ressources fourragères, peut avoir des effets bénéfiques mais aussi néfastes en fonction du type de tannin, de sa structure, de son poids moléculaire et des espèces animales qui les consomment.

La quantification des métabolites secondaires des plantes (MSP) est particulièrement importante pour la nutrition des chèvres. Par exemple, les phénols totaux dans du Tagasaste

(*Cytisus proliferus*) variant d'un taux de 1.4 à 25.4% de matière sèche (MS) a été analysé par SPIR avec une précision de 1.2%MS et une grande linéarité (Flinn *et al.*, 1996).

Plus récemment, l'utilisation de la SPIR a permis de suivre l'évolution des phénols totaux et des tannins condensés de six espèces d'arbustes méditerranéens avec succès (*Cistus salvifolius*, *Halimium halimifolium*, *Myrtus communis*, *Phillyrea angustifolia*, *Pistacia lentiscus* and *Rosmarinus officinalis*) (Mancilla-Leytón *et al.*, 2014).

2.3.3. Digestibilité et ingestion

La qualité nutritionnelle d'un fourrage se retrouve dans deux paramètres qui peuvent être mesurés dans des essais expérimentaux avec des animaux en stabulation, le niveau d'ingestion et la digestibilité du fourrage.

Mesurer ces paramètres dans des conditions expérimentales *in vivo* contrôlées est coûteux, long et laborieux. Les mesurer pour vouloir estimer la qualité nutritionnelle sur un troupeau au pâturage peut être difficile. En effet, pour réaliser ces mesures il est nécessaire de collecter des échantillons de fourrages, directement au champ, représentatifs de ce que le bétail consomme réellement. Or, il est très difficile de simuler avec précision la sélectivité exercée sur les espèces végétales par l'animal (Decruyenaere *et al.*, 2009).

La digestibilité est mesurée par la différence entre le taux de nutriments consommés et le taux de nutriments excrétés dans les fèces. Ceci se traduit par des manipulations lourdes et fastidieuses à mettre en place. Cependant, des méthodes *in vitro* ont été développées, basées sur l'utilisation de jus de rumen (Tilley and Terry, 1963) ou d'enzymes commerciales telle que la méthode pepsine-cellulase (Aufrère *et al.*, 2007). Ces méthodes biologiques de simulation *in vitro* de la digestion microbienne sont étroitement corrélées avec la digestibilité de la matière organique (DMO) et permettent donc une estimation précise de cette dernière.

La détermination indirecte de l'ingestion volontaire nécessite à la fois une mesure de la digestibilité et une collecte totale des fèces. Lorsque cette dernière n'est pas possible, elle est remplacée par l'utilisation de marqueurs indigestibles tels que l'oxyde de chrome (Meuret *et al.*, 1985; Doyle *et al.*, 1994; Malossini *et al.*, 1996), l'ytterbium (Curtis *et al.*, 1994), l'oxyde de titane (Hellwing *et al.*, 2015) ou encore le dosage de *n*-alcanes. La méthode des *n*-alcanes est souvent utilisée pour estimer l'ingestion volontaire avec une bonne précision (Mayes *et al.*, 1986; Oliván *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2015; Reis *et al.*, 2015) grâce au dosage des alcanes C32, C33 et C36 lorsque le nombre d'espèces végétales de la ration est relativement limité, ce qui rend tout de même difficile son application en conditions de pâturage (Decruyenaere *et al.*, 2009).

Etant donné la complexité de mesurer la digestibilité et l'ingestion volontaire chez les animaux, le potentiel de la SPIR comme méthode rapide pour la prédiction de ces deux paramètres a été explorée par de nombreux auteurs et plusieurs papiers de synthèse détaillent ces travaux (Givens and Deaville, 1999; Stuth *et al.*, 2003; Landau *et al.*, 2006).

2.4. EVALUATION NUTRITIONNELLE EN UTILISANT LE SPECTRE PIR DES FECES

2.4.1. Composition chimique des fèces

Au même titre que pour l'analyse de la composition chimique des ressources alimentaires, de par ses qualités de rapidité et de capacité de prédiction d'un grand nombre d'échantillons à moindre coût, la SPIR est très largement utilisée pour la prédiction de la composition chimique des fèces.

Les paramètres couramment prédit dans les fèces par SPIR sont les teneurs en azote, les cendres, le phosphore ou les fibres, que ce soit chez les ruminants (Cozzolino *et al.*, 2002), les monogastriques (Bastianelli *et al.*, 2010) ou même chez les poissons marins (Lopes Galasso *et al.*, 2017).

L'objectif d'utiliser la SPIR pour prédire la composition des fèces peut être de divers types, soit pour établir des relations entre les constituants des fèces et des régimes pour par exemple estimer des digestibilités ou des ingestions volontaires, soit pour utiliser la composition chimique des fèces pour faire des suivis de comportements alimentaires d'animaux domestiques ou sauvages (de Garine-Wichatitsky *et al.*, 2002; Maillard *et al.*, 2005), ou encore, pour utiliser ces prédictions pour des études plus écologiques comme des études de dynamiques des populations (Gaidet, 2005).

2.4.2. Marqueurs fécaux

Comme décrit précédemment, l'estimation de l'ingestion volontaire nécessite la mesure de la digestibilité d'un échantillon représentatif d'un régime et de la mesure de l'excrétion totale de fèces (Landau *et al.*, 2006). Cette dernière est souvent estimée grâce à l'utilisation de marqueurs, soit internes comme le ^{13}C , les fibres au détergent neutre indigestibles (IFDN), la lignine et les *n*-alcanes, soit externes comme avec l'ajout d'oxyde de chrome, d'ytterbium, d'oxyde de titane, de *n*-alcanes et de polyéthylène glycol. L'utilisation de marqueurs externes nécessite que les animaux soient drogués avec le marqueur soit en mélangeant le marqueur à l'alimentation, soit par drogation orale, et le marqueur doit pouvoir être administré aux animaux utilisés pour la consommation.

L'utilisation de marqueurs facilite la détermination de l'ingestion volontaire en évitant la collecte totale des fèces mais en général leur dosage par voie chimique est également coûteux et laborieux. L'application de la SPIR pour doser les marqueurs fécaux offre, encore une fois, un grand potentiel de réduction du travail de laboratoire nécessaire pour estimer l'ingestion volontaire et la digestibilité (Garnsworthy and Unal, 2004). De nombreuses études ont montré la capacité de la SPIR pour doser des marqueurs tels que l'IFDN, la lignine (Hellwing *et al.*, 2015), les *n*-alcanes (Garnsworthy and Unal, 2004; Keli *et al.*, 2008) ou le polyéthylène glycol (Landau *et al.*, 2002; Andueza *et al.*, 2013; Hassoun *et al.*, 2016).

2.4.3. Composition chimique des régimes, digestibilité et ingestion volontaire

Comme décrit par Coleman *et al.* (1995), les fèces sont les produits de la dégradation et de la synthèse des processus digestifs et sont constituées de résidus d'aliments, de tissus cellulaires des plantes et de composants d'origine microbienne et animale. Les fèces devraient contenir des informations sur les quantités et les caractéristiques des régimes.

La SPIR fécale a été initiée par les équipes de recherche de Texas A&M University aux USA (Lyons and Stuth, 1992; Leite and Stuth, 1995) pour évaluer la qualité des régimes ingérés par les bovins et les caprins sur pâturage. Son potentiel comme outil d'aide à la conduite de l'alimentation du bétail en Australie a été décrit par Coates (2000). Depuis, de nombreuses études ont confirmé l'efficacité et l'intérêt de la SPIR fécale dans ce domaine d'application dont le processus d'étalonnage consiste à créer des paires régimes : fèces.

Dans la plupart des études les animaux sont nourris à l'auge avec des échantillons de fourrages fraîchement récoltés ou conservés en foin, mais avec cette méthode il peut être difficile de simuler correctement la sélection exercée par les animaux et d'obtenir un échantillon réellement représentatif de ce que l'animal a consommé, notamment pour des animaux en libre pâture.

Dans de nombreux cas, pour pallier cette difficulté, des échantillons collectés via des fistules œsophagiennes ont été utilisés pour obtenir des régimes représentatifs de ce que l'animal a consommé (Lyons and Stuth, 1992; Leite and Stuth, 1995; Dixon *et al.*, 2010), mais cette technique a un impact sur le bien-être animal.

D'autres méthodes, basées sur l'observation des animaux, ont été développées pour permettre de simuler au mieux la sélection exercée sur les ressources végétales lors du pâturage et donc de collecter des échantillons bien représentatifs de l'ingéré. Il s'agit de la méthode d'observation directe des coups de dents (Meuret *et al.*, 1985; Agreil and Meuret, 2004; Glasser *et al.*, 2008) ou de la méthode de la collecte du berger (Guérin *et al.*, 1986; Chirat, 2010; Assouma, 2016).

Les publications de Dixon and Coates (2009) et de Stuth *et al.* (2003) offrent un panorama des nombreux travaux publiés utilisant la SPIR fécale pour estimer soit les compositions chimiques des régimes (MAT, FDN, FDA, lignine...), soit les digestibilités et les ingestions volontaires, en décrivant les performances des modèles d'étalonnages développés. Depuis, de nombreux travaux ont été publiés appliqués à des moutons (Decruyenaere *et al.*, 2009; Kneebone and Dryden, 2015; Núñez-Sánchez *et al.*, 2016), des chèvres (Glasser *et al.*, 2008), des vaches (Tran *et al.*, 2010; Decruyenaere *et al.*, 2012), des bœufs (Huntington *et al.*, 2011) ou des cerfs (Tellado and Azorit, 2015).

Bien que moins développée que chez les ruminants, la SPIR fécale a aussi prouvé son utilité pour prédire la composition chimique des régimes et leur digestibilité chez les volailles (Bastianelli *et al.*, 2004; Bastianelli *et al.*, 2010), les lapins (Núñez-Sánchez *et al.*, 2012) et les porcs (Bastianelli *et al.*, 2015; Schiborra *et al.*, 2015), mais elle a également été testée pour évaluer la qualité des régimes chez des ours bruns (Steyaert *et al.*, 2012).

Certains auteurs ont essayé de prédire les paramètres d'ingestion ou de digestibilité à partir des spectres des aliments et des fèces utilisés conjointement pour exploiter la complémentarité des informations (Dixon and Coates, 2009). Cette technique ne peut évidemment être utilisée que lorsque l'on a accès à des échantillons représentatifs de l'aliment, mais dans ce cas la précision des modèles est augmentée.

Cette approche de concaténation des spectres des aliments et des fèces a par exemple permis d'améliorer les modèles de prédiction de la matière organique volontairement ingérée (MOVI) chez des moutons (Decruyenaere *et al.*, 2009) et également les prédictions sur les mesures de digestibilité des nutriments chez les volailles (Coulibaly *et al.*, 2013).

2.4.4. Composition botanique des régimes

D'après Dixon and Coates (2009), il y a suffisamment d'informations spectrales proche infrarouge (PIR) disponibles dans les fèces des herbivores pour établir des modèles pour identifier des constituants botaniques des régimes à partir des spectres PIR des fèces.

De nombreuses études ont montrées l'utilité de la SPIR fécale pour prédire différentes espèces végétales dans des régimes en utilisant des paires régimes : fèces issues d'expérimentations où des moutons, des chèvres ou des vaches étaient nourries en cages (Walker *et al.*, 1998; Decruyenaere *et al.*, 2004).

De même, d'autres approches ont montrés la capacité de la SPIR fécale pour prédire par exemple les pourcentages de différentes espèces végétales dans un mélange et le pourcentage de concentré (Núñez-Sánchez *et al.*, 2016), ou même pour discriminer des vaches laitières entre deux niveaux de complémentation (Ottavian *et al.*, 2015), ou encore pour prédire les proportions entre seulement deux classes de végétaux (monocotylédone : dicotylédone) présents dans des régimes de ruminants (Coates and Dixon, 2008).

Ces dernières approches consistant à prédire des proportions de constituants d'un régime, très utilisées chez les ruminants, ont également été testées chez des mammifères marins, des phoques alimentés par des mélanges de trois espèces de poissons (Kaneko and Lawler, 2006).

Le principal problème qui rend l'applicabilité de la SPIR fécale pour la prédiction de la composition botanique douteuse est de savoir si la variabilité spectrale présente dans les fèces et utilisée pour les étalonnages est pertinente pour l'application dans des conditions de terrains (Landau *et al.*, 2006). En effet, la plupart des mesures ont été réalisées avec des animaux confinés, nourris avec les principales, mais pas toutes les espèces disponibles sur parcours. En général de bonnes précisions des étalonnages sont obtenues pendant la phase d'étalonnage, mais certains étalonnages ne sont pas assez robustes pour prédire la diversité des espèces du parcours lorsque les étalonnages sont testés en validation externe (Landau *et al.*, 2006; Glasser *et al.*, 2007; Glasser *et al.*, 2008; Núñez-Sánchez *et al.*, 2016).

De manière générale, que ce soit pour la prédiction de la composition botanique des régimes ou que ce soit pour la prédiction de la composition chimique des régimes, la digestibilité ou l'ingestion volontaire, les auteurs dans leur ensemble sont d'accord pour dire qu'il est nécessaire d'augmenter la variabilité des bases d'étalonnages pour augmenter la robustesse des modèles de prédictions utilisant la SPIR fécale. Pour cela, il est nécessaire de multiplier les essais et d'augmenter les collaborations entre équipes pour construire des bases de données de plus en plus variables et de plus en plus robustes.

3. OBJECTIFS ET CONTEXTE DE L'ETUDE

Cette étude a été réalisée au sein de l'unité de recherche SELMET, unité mixte de recherche CIRAD, INRA et SupAgro dont certains agents, depuis des années, s'intéressent notamment à la caractérisation des ressources alimentaires et aux pratiques d'élevage et d'alimentation du bétail dans des conditions à forte contraintes et dans des systèmes à composante pastorale ou agropastorale.

Dans le cadre de divers programmes de recherche ou de travaux de thèses, des essais d'alimentations ou des suivis de troupeaux ont permis la collecte d'échantillons de couple de régimes : fèces. Dans certains cas, ces échantillons ont déjà été utilisés pour estimer la qualité des régimes en utilisant la SPIR fécale, mais dans le contexte limité de chaque essai.

L'objectif principal de cette étude est donc de recenser et regrouper les jeux de données historiques de l'unité pour construire un outil SELMET de prédiction rapide de la qualité des régimes alimentaires par l'analyse SPIR des fèces, appelé QualiFNIRS, applicable aux divers terrains de l'unité. Les jeux de données historiques de l'unité SELMET seront complétés dans le cadre de ce Master par des collectes de nouveaux échantillons sur deux terrains, Sénégal et Madagascar, de manière à apporter plus de la variabilité.

Dans le contexte limité par le temps dans lequel s'inscrit ce stage de Master, il a été décidé de centrer cette étude sur une seule espèce animale, les bovins, et de limiter dans un premier temps, la mesure de la qualité des régimes à l'estimation de sa composition chimique.

Cette étude représente le point de départ du développement de l'outil QualiFNIRS dont l'objectif à plus long terme est de permettre l'estimation à la fois de la composition chimique, mais aussi des quantités ingérées, de la digestibilité, de la composition botanique et de la proportion en concentré des régimes ingérés.

4. MATERIELS ET METHODES

4.1. DESCRIPTION DES JEUX DE DONNEES

A ce jour, un total de 8 jeux de données différents a pu être récupéré ou collecté, soit 3 jeux de données provenant du Sénégal, 2 jeux données de Madagascar, 1 jeu de données de l'île de la Réunion, 1 jeu de données du Vietnam et 1 jeu de données de Guyane Française.

Ces jeux de données sont variables non seulement selon leurs origines géographiques mais aussi selon les conditions climatiques, les systèmes d'élevage, les conditions expérimentales et les années de collectes. Ils sont constitués de paires de régime : fèces dans lesquels les régimes, en fonction des essais, peuvent être soit des fourrages seuls, soit des rations complètes contenant des mélanges de fourrages et de concentrés dont les proportions ont été reconstituées.

Issus de divers programmes de recherche, travaux de thèses ou collectés à l'occasion de ce stage de Master, chaque jeu de données sera décrit en terme de contexte et de nombre d'échantillons. Les critères disponibles pour les rations complètes sont la matière organique (MOrat), la matière azotée totale (MATrat), les fibres au détergent neutre (FDNrat), les fibres

au détergent acide (FDArat) et la lignine au détergent acide (LDArat). La description statistique des critères des différents jeux de données est donnée dans le .

4.1.1. Jeu de données : SEN01

Le jeu de données SEN01 contient 84 échantillons de couples régime : fèces provenant du programme de recherche Alimentation du Bétail Tropical (ABT), programme de recherche commun entre le CIRAD et l'ISRA qui s'est déroulé entre 1979 et 1998.

Les échantillons sont issus de 12 essais expérimentaux de mesure en cages de digestibilité *in vivo*, réalisés entre novembre 1996 et avril 1998, à la station expérimentale du LNERV-ISRA à Dakar (Sénégal).

Tous les échantillons d'aliments et de fèces collectés lors de ces essais ont été analysés chimiquement par le laboratoire d'alimentation animale du CIRAD à Maisons-Alfort (France) au moment des essais.

4.1.2. Jeu de données : SEN02

Le jeu de données SEN02 contient 145 échantillons de couples régime : fèces provenant des travaux de thèse de Mohamed Habibou Assouma (Assouma, 2016).

Les échantillons ont été collectés lors de suivis de troupeaux dans un rayon de 15 km autour du forage de Widou Thiengoly dans la zone sahélienne du nord du Sénégal, entre juin 2014 et octobre 2015.

Les échantillons de fèces ont été récoltés frais directement au sol lors des suivis des animaux au parcours. De manière à être le plus représentatifs possible et de simuler au mieux les quantités et les proportions des différentes composantes des régimes ingérés par les animaux, les échantillons de régimes ont été collectés au cours des suivis de parcours journaliers en appliquant la méthode de la collecte du berger (Guérin *et al.*, 1986).

Les échantillons de fèces ayant été collectés directement au sol lors de suivis, 32 échantillons parmi les 145 initialement collectés ont été supprimés du jeu de données à cause de leur forte contamination par du sol. En effet, un fort taux de matières minérales dans les échantillons de fèces perturbe la prédiction en SPIR. Ce sont donc 113 échantillons qui seront utilisés dans cette étude.

Pour ce jeu de données, les compositions chimiques des régimes ont été obtenues par prédiction PIR après une actualisation des modèles disponibles au laboratoire d'alimentation animale du CIRAD à Montpellier grâce à une sélection de 30 échantillons envoyés à Montpellier pour analyses chimiques par les méthodes chimiques de référence.

Tableau 1. Description statistique des paramètres des différents jeux de données de QualiFNIRS

		SEN01	SEN02	SEN03	MAD01	MAD02	REU01	VNM01	GUY01
Nb. d'obs.		84	113	8	32	7	357	730	140
MO	Médiane	81,9	86,0	89,7	93,5	88,8	non disponible		95,6
(%MS)	Min-Max	80.9-84.2	76.4-96.3	89.6-90.3	91.1-94.8	79.8-91.6			94.8-95.9
	Ecart-type	0,87	4,98	0,27	1,35	4,00			0,39
MAT	Médiane	12,7	13,4	7,9	12,6	8,8	14,4	12,7	3,9
(%MS)	Min-Max	11.1-14.5	4.8-23.8	6.9-8.1	7.8-15.7	7.7-11.6	11.8-17.0	5.2-19.0	3.1-5.0
	Ecart-type	1,06	4,63	0,43	2,79	1,42	1,32	3,18	0,58
FDN	Médiane	60,6	52,5	55,1	49,5	65,3	40,9	51,6	75,6
(%MS)	Min-Max	56.9-67.2	31.3-71.6	54.9-56.3	39.2-65.6	51.6-70.7	30.5-50.5	31.8-66.4	73.6-76.9
	Ecart-type	2,47	9,28	0,48	9,20	6,65	4,21	9,76	1,00
FDA	Médiane	36,6	27,6	27,5	24,5	37,5	23,6	30,8	38,1
(%MS)	Min-Max	33.2-38.3	18.5-42.3	27.2-28.9	18.1-35.2	28.8-41.3	16.5-30.7	22.0-44.6	33.8-41.3
	Ecart-type	1,47	5,67	0,57	6,22	4,08	2,86	5,79	2,18
LDA	Médiane	5,1	6,4	4,6	2,7	6,5	3,4	4,2	6,0
(%MS)	Min-Max	3.0-7.8	0.3-26.7	4.6-4.7	2.2-5.4	4.2-8.1	1.9-5.1	2.3-8.4	4.6-7.1
	Ecart-type	1,38	6,03	0,01	1,10	1,26	0,58	1,33	0,71

4.1.3. Jeu de données : SEN03

Le jeu de données SEN03 contient 8 échantillons de couples régime : fèces qui ont été collectés dans le cadre de ce stage de Master lors d'une mission de 2 semaines au Sénégal du 6 au 17 février 2017. La collecte a eu lieu dans la ferme expérimentale de la Laiterie du Berger (LDB) à Richard Toll (Sénégal) en zone sahélienne sur les 8 vaches laitières en production au moment de la collecte.

La ferme expérimentale de la LDB pratique un rationnement individualisé préparé par pesée pour les vaches en production. La ration se compose principalement de paille de canne à sucre et d'ensilage de sorgho complétés par un aliment du bétail commercial et du son de riz. La même ration est distribuée aux 8 vaches qui ont fait l'objet d'un prélèvement de fèces. Un prélèvement de chaque constituant de la ration a été réalisé au moment de la distribution. Tous les échantillons de régimes et de fèces ont été préparés dans le service Alimentation - Nutrition du LNERV-ISRA à Dakar et rapportés au laboratoire d'alimentation animale du CIRAD à Montpellier.

Les compositions chimiques des échantillons d'aliments ont été déterminées par mes soins lors de cette période de stage par les méthodes de référence au laboratoire d'alimentation animale du CIRAD.

4.1.4. Jeu de données : MAD01

Le jeu de données MAD01 qui contient 48 échantillons de couples régime : fèces provient de la collecte d'échantillons réalisée à la ferme ARMOR du FIFAMANOR à Antsirabe (Madagascar) dans le cadre de ce stage de Master et qui pourront s'intégrer postérieurement dans l'étude « Quantification of intake and diet selection of ruminants grazing heterogeneous pasture using compound specific stable isotopes » de l'AIEA dont le FIFAMANOR est le coordinateur.

La ferme ARMOR du FIFAMANOR possède 350 vaches de race pie rouge séparées en lots en fonction du sexe, de l'âge ou du niveau de production laitière. Pour les besoins de cette étude, trois collectes d'échantillons ont été réalisées dans 4 lots d'animaux distincts (lot de génisses, lot de vaches basses productrices, lot de vaches hautes productrices et lot jeunes mâles) de manière à apporter de la variabilité à l'échantillonnage, à raison de 3 échantillons par lots, soit 16 échantillons par collecte. Les protocoles de collecte ont pu être discutés lors de ma présence sur place en octobre 2016 où j'ai pu participer à la première collecte d'échantillons. Les collectes suivantes ont eu lieu en décembre 2016 et en mars 2017, à chaque changement de ration.

Tous les échantillons de régimes et de fèces ont été préparés dans le laboratoire d'alimentation animale du FIFAMANOR à Antsirabe (Madagascar) et rapportés au laboratoire d'alimentation animale du CIRAD à Montpellier où les compositions chimiques des échantillons d'aliments ont été déterminées par mes soins lors de cette période de stage par les méthodes de référence.

Dans le cadre de cette étude, seules les deux premières collectes correspondant au mois d'octobre et au mois de décembre 2016 seront prises en compte. La collecte du mois de mars

2017 sera incluse dans le jeu de données postérieurement car à ce jour tous les éléments pour reconstituer les rations ne sont pas connus. Ce sont donc 32 échantillons qui seront utilisés dans cette étude.

4.1.5. Jeu de données : MAD02

Le jeu de données MAD02 qui contient 7 échantillons de couples régime : fèces provient de la collecte d'échantillons réalisée directement dans des exploitations agricoles, éleveurs de zébus, de la région du Moyen-Ouest, Vakinankaratra (Madagascar). Les protocoles de collecte ont été mis en place lors de ma présence sur place en octobre 2016 et les collectes d'échantillons ont eu lieu régulièrement entre octobre 2016 et mars 2017 de manière à couvrir deux saisons, la fin de la saison sèche et le début de la saison des pluies.

Ces collectes d'échantillons s'intègrent dans l'étude « Analyse des pratiques de gestion de l'alimentation des zébus, dont le pâturage, en période de la saison sèche » en appui aux travaux de thèse en cours d'Elias Romélio Rasambatra, où lors de la phase de terrain, des prélèvements d'échantillons des espèces végétales les plus consommées sur chaque zone de pâturage ont été mis en place.

Les collectes d'échantillons de fèces ont été réalisées directement dans l'étable, le surlendemain matin de la collecte des échantillons d'espèces végétales sur le terrain de manière à ce que les fèces collectées correspondent le plus possible au régime consommé l'avant-veille (durée de la digestion et du transit) et qui a fait l'objet d'un prélèvement d'échantillons des espèces végétales.

Tous les échantillons d'espèces végétales et de fèces ont été rapportés au laboratoire d'alimentation animale du CIRAD à Montpellier où les compositions chimiques des échantillons de régimes ont été déterminées par mes soins lors de cette période de stage par les méthodes de référence.

4.1.6. Jeu de données : REU01 et VNM01

Les jeux de données REU01 et VNM01 contiennent respectivement 357 et 730 échantillons de couples régime : fèces provenant des travaux de thèse de Hiep Tran (Tran, 2009).

Les collectes d'échantillons ont été réalisées dans des élevages de cinq régions à La Réunion et trois régions au Vietnam sélectionnées pour être représentatifs des systèmes d'alimentation utilisés à La Réunion et au Vietnam. Dans le cadre de ces travaux de thèse, les suivis des troupeaux laitiers ont été réalisés sur 10 fermes à La Réunion et 15 au Vietnam pendant 3 ans, entre 2005 et 2008.

Le suivi de l'alimentation des animaux a consisté, entre autre, à mesurer la nature et les quantités des aliments ingérés. Un échantillon de chaque aliment, fourrage et concentré, a été prélevé à l'auge et les prélèvements fécaux ont été réalisés le lendemain directement dans le rectum.

Pour ce jeu de données, les compositions chimiques des régimes ont été obtenues par prédiction PIR avec des modèles de prédiction adaptés aux fourrages tempérés et tropicaux et disponibles au laboratoire de SELMET à La Réunion.

4.1.7. Jeu de données : GUY01

Le jeu de données GUY01 contient 140 échantillons de couples régime : fèces qui sont issus des travaux de stage d'une élève ingénieur Mélanie Jobin (Jobin, 2012) réalisés dans le cadre du programme de recherche CARPAGG et dont les activités ont été réalisées en Guyane dans le contexte de mise en œuvre de méthodes d'estimations indirectes de CH₄ dans des élevages bovins.

Les échantillons de fourrages et de fèces ont été collectés dans deux exploitations différentes au moment de l'entrée, à mi exploitation et à la sortie des animaux des parcelles fourragères, entre septembre et décembre 2011.

Tous les échantillons de fourrages et de fèces ont ensuite été envoyés au laboratoire de l'URZ de l'INRA en Guadeloupe pour analyses.

4.2. METHODES D'ANALYSES

Tous les échantillons de régimes que j'ai pu collecter dans le cadre de ce stage, soit 85 échantillons, ont été caractérisés chimiquement par la détermination de la matière sèche résiduelle, de la matière organique, de la matière azotée totale ou encore des constituants pariétaux. De même, l'ensemble des échantillons de fèces et d'aliments constituant les régimes des différents jeux de données ont été saisis en SPIR.

4.2.1. Spectrométrie dans le proche infrarouge

Les échantillons collectés et rassemblés pour constituer la base QualiFNIRS proviennent de zones géographiques et d'années de collectes différentes. Les spectres PIR correspondant ont donc été saisis avec des équipements SPIR différents et localisés dans différentes régions du monde. Le Tableau 2 résume les différentes conditions de saisies spectrales pour chaque jeu de données.

Tableau 2. Liste des différents spectromètres PIR utilisés pour l'acquisition des spectres de la base QualiFNIRS

	Equipement	Lieu	Plage de LO	Nombre LO
SEN01	Foss NIRSystem6500	CIRAD Montpellier	400-2500	1050
SEN02	ASD LabSpec 4	IRD Dakar	350-2500	2150
SEN03	Foss NIRSystem5000	CIRAD Montpellier	1100-2500	700
MAD01	Foss NIRSystem5000	CIRAD Montpellier	1100-2500	700
MAD02	Foss NIRSystem5000	CIRAD Montpellier	1100-2500	700
REU01	Foss NIRSystem5000	CIRAD La Réunion	1100-2500	700
VNM01	Foss NIRSystem5000	CIRAD La Réunion	1100-2500	700
GUY01	Foss NIRSystem5000	INRA Guadeloupe	1100-2500	700

LO = longueur d'onde

Chaque spectromètre PIR étant différent, pour assurer la compatibilité des divers jeux de données et permettre le rassemblement des spectres, une standardisation a été réalisée entre tous ces spectromètres selon la méthodologie développée par Shenk and Westerhaus (1991). Au final pour QualiFNIRS, seules les longueurs d'ondes (LO) comprises entre 1100 et 2500 nm

avec un pas de 2 nm ont été conservées, soit 700 points d'absorbance par spectre ce qui correspond à un spectromètre Foss NIRSystem5000.

4.2.2. Matière sèche et matière organique

La matière sèche résiduelle (MS) est obtenue par la mesure de perte de masse que subit un échantillon lorsqu'il est placé dans une étuve à 103°C pendant 4h selon la norme AFNOR NF V 18-109.

La détermination des cendres consiste à une calcination de l'échantillon à 550°C pendant 4h dans un four à moufle selon la norme AFNOR NF V 18-101. La matière organique est obtenue par le calcul suivant : $MO = 100 - \text{cendres}$.

4.2.3. Matière azotée totale

La détermination de l'azote est réalisée selon la méthode Kjeldahl en utilisant la méthode de digestion en bloc et distillation à la vapeur selon la norme AFNOR NF EN ISO 5983-2.

Le contenu en matière azotée totale est ensuite déduit en appliquant un facteur de conversion de 6.25 ($MAT = N \times 6.25$)

4.2.4. Constituants pariétaux (FDN, FDA, LDA)

La détermination séquentielle des constituants pariétaux (FDN, FDA et LDA) a été réalisée sur un Fibersac semi-automatique 24 de Ankom (Ankom Technology Corporation, USA) en utilisant la méthode mise au point par Van Soest (1991) et adaptée par les normes AFNOR NF EN ISO 16472 et NF EN ISO 13906.

5. RESULTATS

5.1. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNEES QUALIFNIRS

5.1.1. Composition chimique

Un total de 1471 échantillons de couples régime : fèces a pu être rassemblé pendant ce stage provenant principalement de jeux de données historiques de l'unité SELMET. Grâce aux 85 échantillons de régimes collectés sur les deux terrains visités lors de ce stage à Madagascar et au Sénégal et analysés chimiquement, ce sont 47 nouveaux couples régime : fèces qui ont pu être ajoutés à la base. La description statistique de la composition chimique des régimes associés aux spectres de fèces de la base QualiFNIRS est donnée dans le Tableau 3.

Tableau 3. Description statistique du jeu de données QualiFNIRS

	MOrat (%MS)	MATrat (%MS)	FDNrat (%MS)	FDArat (%MS)	LDArat (%MS)
Nb. d'obs.	384	1471	1471	1471	1471
Minimum	76.40	3.13	30.54	16.51	0.30
Maximum	96.29	23.82	76.90	44.62	26.66
Médiane	91.08	13.10	50.10	28.80	4.15
Moyenne	89.47	12.32	50.79	30.06	4.69
Ecart-type	6.05	3.92	12.35	6.41	2.26

On peut noter sur le Tableau 3 que la quantité de données de MO disponible est relativement faible par rapport au reste des paramètres. Ceci aura certainement des conséquences sur la qualité des modèles de prédiction de la MO des rations par SPIR fécale.

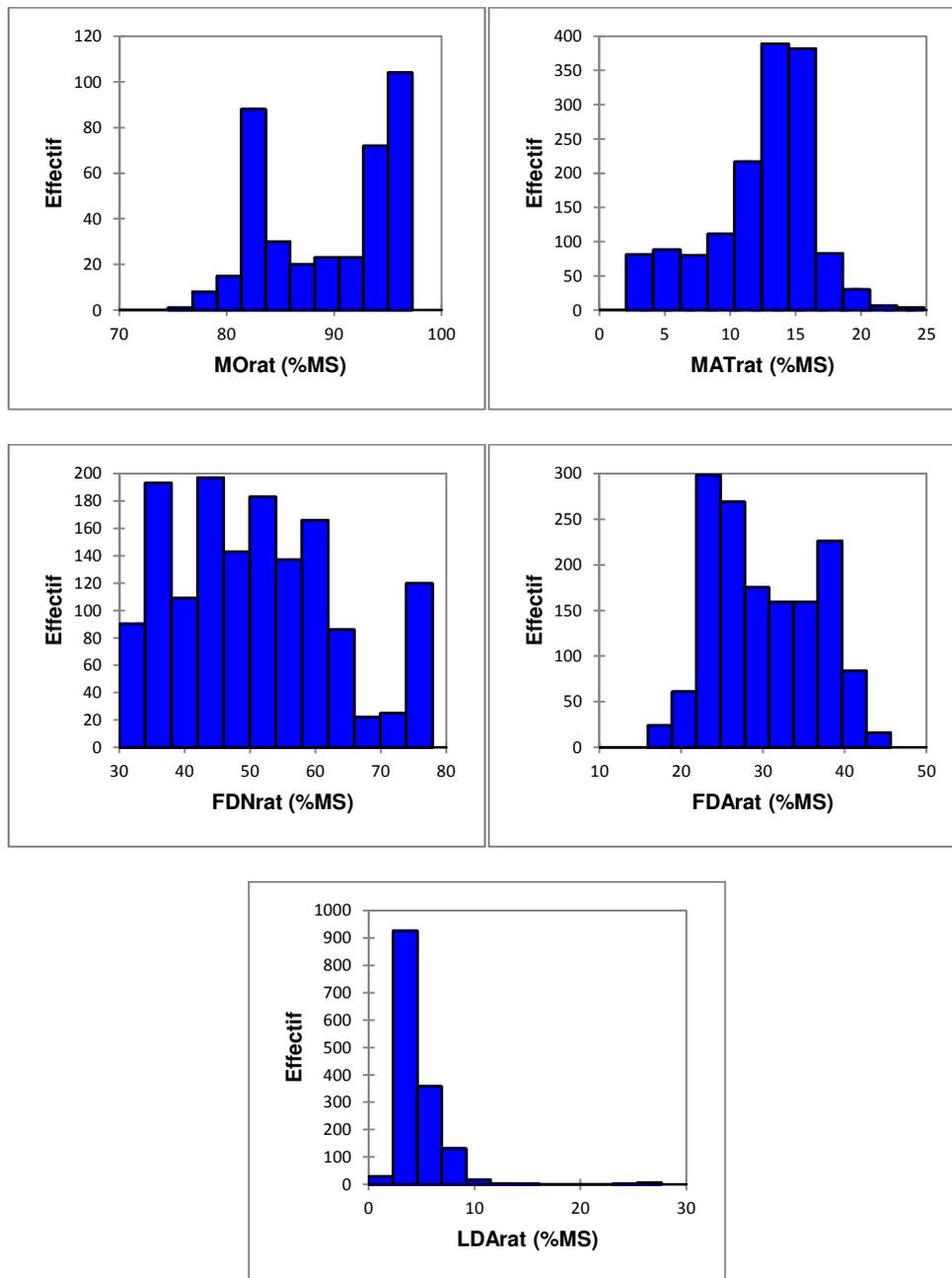


Figure 1. Histogrammes de distribution des paramètres de QualifNIRS

Les histogrammes de la Figure 1 montrent que les distributions des paramètres MO, MAT et LDA sont assez déséquilibrées si l'on considère qu'une distribution idéale et homogène pour établir de bons étalonnages doit être rectangulaire. Dans le cas particulier de LDA, cette distribution est due à la présence de quelques régimes à forte composante ligneuse provenant du jeu de données SEN02 récoltés en saison sèche chaude. Par contre, les distributions des

FDN et FDA semble plus adaptées à obtenir des étalonnages corrects même si peu d'échantillons entre 65 et 75%MS de FDN sont présents.

5.1.2. Données spectrales

La base de données spectrale QualiFNIRS contient donc 1471 spectres de fèces de bovins auxquels ont été associés les données de composition chimiques des régimes décrits dans le Tableau 3. Une analyse en composante principale (ACP) est réalisée sur les spectres des fèces de la base QualiFNIRS afin de voir la répartition des divers jeux de données spectraux au sein de la base totale QualiFNIRS.

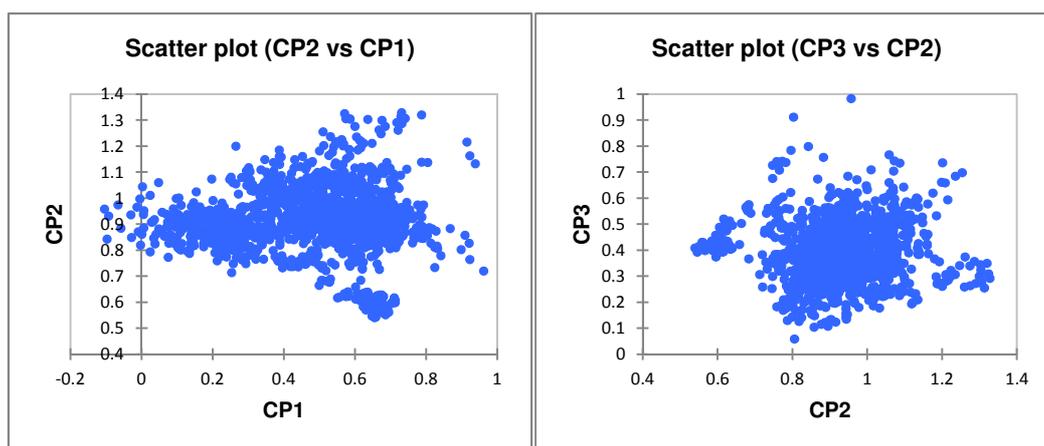


Figure 2. Représentations graphiques de l'ACP pour les 3 premières composantes principales de la base QualiFNIRS

Les représentations graphiques des CP1 : CP2 et CP2 : CP3 sur la Figure 2 montrent une répartition plutôt homogène des 8 jeux de données rassemblés qui est le signe d'une bonne cohérence du rassemblement de ces divers jeux de données pour constituer la base spectrale QualiFNIRS.

5.2. DESCRIPTION DES ETALONNAGES SPIR QUALIFNIRS

5.2.1. Description statistique des performances des étalonnages QualiFNIRS

La description statistique des étalonnages de prédiction de la composition chimique des régimes à partir des spectres de fèces est résumée dans le Tableau 4 et la Figure 3.

Tableau 4. Description statistique des étalonnages QualiFNIRS de prédiction de la composition chimique des régimes à partir des fèces

	Nb.	Moyenne	Ecart-type	SEC	R^2_{cal}	SECV	R^2_{cv}
MOrat (%MS)	351	89.49	6.10	1.14	0.97	1.57	0.93
MATrat (%MS)	1409	12.26	3.88	1.42	0.87	1.52	0.85
FDNrat (%MS)	1392	50.64	12.37	4.31	0.88	4.86	0.85
FDArat (%MS)	1405	30.00	6.34	2.41	0.86	2.73	0.81
LDArat (%MS)	1349	4.46	1.36	0.60	0.80	0.69	0.74

Nb. = nombre d'échantillons de la population conservée pour l'étalonnage ; SEC = écart-type résiduel de l'étalonnage ; R^2_{cal} = coefficient de détermination de l'étalonnage ; SECV = écart-type résiduel de la validation croisée ; R^2_{cv} = coefficient de détermination de la validation croisée

De manière générale, les SEC obtenus pour les différents étalonnages avec la base QualiFNIRS sont plus élevés et les R^2_{cal} sont inférieurs à ceux que l'on peut retrouver en moyenne dans la littérature. Si l'on regarde spécifiquement pour les MAT dans les différents travaux reportés par Dixon and Coates (2009), toutes espèces animales confondues, les SEC et R^2_{cal} moyens obtenus sont respectivement de 0.90%MS et 0.92 avec des valeurs qui varient entre 0.2 et 1.5%MS pour les SEC et entre 0.70 et 0.99 pour les R^2_{cal} alors que ceux obtenus dans notre étude sont respectivement de 1.42%MS et 0.87.

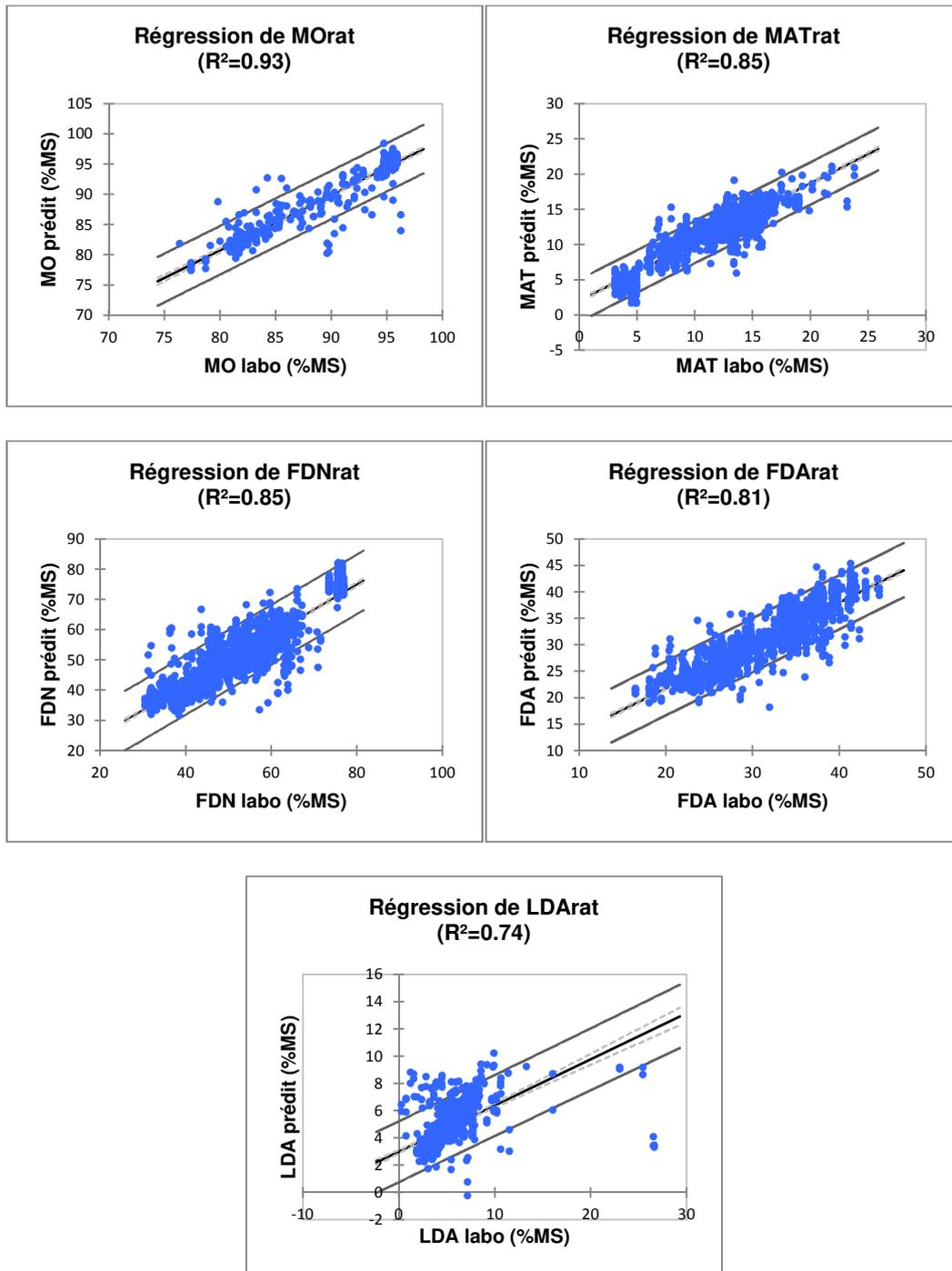


Figure 3. Régressions linéaires entre les valeurs prédites à partir des fèces par SPIR et les valeurs de référence pour les paramètres MO, MAT, FDN, FDA et LDA des régimes

Cependant, bien que les performances de nos étalonnages soient plutôt dans les valeurs hautes que celles rencontrées en moyenne dans la littérature, elles sont en cohérence avec celles rapportées par Tran *et al.* (2010) dont les données correspondent aux jeux de données REU01 et VNM01 qui représentent les $\frac{3}{4}$ de la population totale de QualiFNIRS. En effet, les SEC obtenus par Tran *et al.* (2010) pour les MAT, FDN et FDA étaient respectivement de 1.30, 4.20 et 2.34%MS alors qu'ils sont de 1.42, 4.31 et 2.14%MS pour QualiFNIRS.

Etre capable de prédire les compositions chimiques des régimes ingérés par les animaux directement à partir de l'analyse PIR des fèces, avec une bonne précision, a une grande importance pour mieux comprendre le comportement alimentaire des bovins en libre pâture.

Divers facteurs vont influencer les performances et la précision des étalonnages. Parmi eux, la qualité de la mesure de référence. Un étalonnage étant la régression linéaire entre les caractéristiques d'un échantillon (mesure de référence) et l'information spectrale, la qualité de la mesure de référence aura un effet direct sur la qualité des étalonnages. Il est donc important de s'assurer de l'origine des données de référence, de la capacité technique du laboratoire à les produire s'il s'agit de mesures chimiques, ou encore de la méthodologie utilisée s'il s'agit de valeurs calculées, si l'on ne veut pas détériorer la précision des étalonnages. Dans le cas de cette étude qui utilise la SPIR fécale, la mesure de référence correspond à la composition chimique du régime ingéré par l'animal, donc un facteur important sera la méthodologie utilisée pour collecter les échantillons d'aliments et pour reconstituer les régimes, en sachant que dans QualiFNIRS chaque jeu de données utilise une méthodologie différente pour cela. Parmi les méthodologies possibles, on peut distinguer :

- Les méthodes directes à l'auge où les mesures de la qualité et de la quantité ingérée sont relativement faciles et précises. C'est le type de méthodes utilisées pour SEN01, SEN03, MAD01, REU01, VNM01 ou GUY01 et c'est la méthodologie généralement utilisée dans la littérature.
- Les méthodes indirectes telles que les méthodes d'observations des animaux comme la méthode de la collecte du berger. Bien que moins précises que les méthodes directes car elles sont basées sur la simulation du comportement alimentaire des animaux, elles sont plus intéressantes au plan pratique car elles sont appliquées aux animaux sur parcours. C'est le type de méthodes utilisées pour SEN02 ou MAD02.

De la même manière que la qualité de la mesure de référence, la qualité de la mesure spectrale aura aussi un effet direct sur la qualité des étalonnages. Les facteurs principaux qui vont faire varier les spectres sont le type de spectromètre (marque, modèle), la préparation des échantillons (séchage, broyage), le mode de collecte des fèces (rectum, au sol,...), les conditions climatiques ou d'environnement au moment de la mesure (extérieur, intérieur, temps sec, temps humide) ou encore le nombre de répétitions et la représentativité des répétitions pour obtenir le spectre. Dans la base QualiFNIRS sont présents des spectres avec différents spectromètres de différentes marques, saisis à différentes saisons (sèche et humide) et dont les échantillons ont été séchés et broyés dans des laboratoires différents avec des broyeurs différents.

L'impact de ces facteurs de variation sur les performances des étalonnages des différents jeux de données sera évalué un peu plus loin lors d'essais en extrapolation.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de construire la base QualiFNIRS en utilisant les spectres correspondant à des prélèvements individuels des animaux, ce qui ajoute aux facteurs d'influences vu précédemment la variabilité individuelle des animaux. L'effet de la variabilité individuelle des animaux avait pu être testé par Tran *et al.* (2010), sur les jeux de données REU01 et VNM01 où en moyennant les animaux de chaque groupe avec le même niveau de production laitière et le même niveau d'ingestion de fourrage, une diminution moyenne de 44% du SEP avait pu être observée sur les différents critères prédits.

5.2.2. Evaluation de la capacité d'extrapolation des étalonnages QualiFNIRS

Comme décrit précédemment, la base de données QualiFNIRS est donc le rassemblement de plusieurs jeux de données. La description des performances a montré que bien que les précisions des modèles obtenus ne soient pas optimales elles restent acceptables. Cependant, au plan pratique, l'intérêt des étalonnages SPIR est de pouvoir être applicables à de nouveaux jeux de données et donc il est important de savoir si ces modèles de prédiction de la composition chimique des régimes à partir des spectres de fèces sont suffisamment robustes pour cela.

La robustesse des modèles sera évaluée en testant la capacité d'extrapolation des étalonnages en prédisant les divers jeux de données avec le reste de la base de données QualiFNIRS. Afin de simplifier la présentation des résultats, seuls les essais de prédiction avec les étalonnages pour les MAT et les FDA des régimes seront présentés. De même, vu le nombre limité des échantillons de certains jeux de données, les jeux de données SEN02 et SEN03 seront traités ensemble ainsi que les jeux de données MAD01 et MAD02.

Tableau 5. Description statistique des prédictions de MAT et de FDA des régimes des différents jeux de données en conditions d'extrapolation à partir des fèces

	Jeu de validation	SEC	R ² _{cal}	Nb.val	SEP	R ² _{val}	Biais	Pente
MATrat (%MS)	SEN01	1.38	0.88	84	1.63	0.04	3.72	-0.21
	SEN02 & SEN03	1.20	0.90	121	4.13	0.23	1.43	0.87
	MAD01 & MAD02	1.38	0.87	39	2.62	0.18	2.40	0.57
	REU01	1.51	0.87	357	1.79	0.22	2.87	0.32
	VNM01	0.93	0.96	730	2.61	0.33	2.47	0.88
	GUY	1.43	0.76	140	2.14	0.06	-4.64	-0.08
FDArat (%MS)	SEN01	2.46	0.85	84	2.45	0.01	-0.98	-0.06
	SEN02 & SEN03	2.18	0.88	121	8.98	0.01	-5.53	0.07
	MAD01 & MAD02	2.41	0.86	39	5.28	0.49	-5.20	1.45
	REU01	2.53	0.82	357	4.18	0.04	-5.47	0.16
	VNM01	1.77	0.93	730	4.27	0.46	0.36	1.06
	GUY	2.45	0.83	140	2.84	0.22	12.00	0.33

SEC = écart-type résiduel de l'étalonnage ; R²_{cal} = coefficient de détermination de l'étalonnage ; Nb.val. = nombre d'échantillons de la population de validation ; SEP = écart-type résiduel de validation ; R²_{val} = coefficient de détermination de la validation.

Les résultats des validations en extrapolation dans le Tableau 5 montrent des SEP plus fort que les SEC, des R^2_{val} très faibles et des effets importants sur les biais et les pentes des prédictions. Ces résultats montrent que les étalonnages actuels, établis avec la base de données QualiFNIRS ne sont pas assez robustes et qu'il est donc très important d'augmenter cette robustesse en continuant d'inclure régulièrement de nouveaux jeux de données afin d'enrichir la variabilité de la base.

Comme décrit précédemment, dans QualiFNIRS chaque jeu de données contient des sources d'erreurs et de variabilité différentes dont la somme explique les moindres performances des étalonnages globaux. La comparaison des SEC et R^2_{cal} des différents étalonnages pour MAT et FDA, après avoir retiré alternativement chaque jeu de données de la base QualiFNIRS (Tableau 5), indique des performances équivalentes dans tous les cas, à l'exception du jeu de données VNM01 qui contient beaucoup d'échantillons par rapport aux autres jeux de données et qui a donc un plus fort poids dans la base.

Ces résultats montrent que les facteurs qui vont influencer la précision des étalonnages propre à chaque jeu de données, tels que la qualité de la mesure de référence (origines variées des données, méthodes directes et indirecte de collecte et de reconstitution des régimes,...) ou la qualité de la mesure spectrale (type de spectromètre, broyage, environnement,...), n'ont pas d'effet sur les performances des étalonnages. Nous pouvons en conclure que pour essayer d'augmenter la robustesse, il est plus important de multiplier les essais et ce quelles que soient les conditions expérimentales que de chercher à standardiser les conditions expérimentales.

5.2.3. Essais d'amélioration de la capacité d'extrapolation des étalonnages QualiFNIRS

Afin de confirmer l'intérêt de rajouter régulièrement des nouveaux jeux de données pour enrichir la variabilité de la base QualiFNIRS, un essai d'enrichissement partiel va être testé. Cet essai sera réalisé avec le jeu de données REU01 qui contient un nombre relativement important d'échantillons, soit 357 individus.

L'essai d'enrichissement consiste à enrichir la base de données QualiFNIRS avec environ 20% des échantillons du jeu d'essai REU01 et à tester ensuite la prédiction du reste du jeu de données REU01 avec ce nouveau modèle enrichi. L'effet de cet enrichissement partiel sera évalué sur la variabilité spectrale et les performances des étalonnages.

79 échantillons sélectionnés aléatoirement parmi les 357 échantillons du jeu de données REU01 ont donc été ajoutés à la base QualiFNIRS et le reste des échantillons, soit 278 a donc été prédit avec les nouveaux modèles enrichi.

5.2.3.1. Effet de l'enrichissement partiel de la base QualiFNIRS sur la variabilité spectrale

L'impact de l'enrichissement a été évalué sur la variabilité spectrale, les résultats sont résumés dans le Tableau 6 et la Figure 4.

Tableau 6. Comparaison des GH et NH du jeu de données REU01 avant et après enrichissement partiel de QualiFNIRS

	GH avant (d)	GH après (g)	NH avant (d)	NH après (g)
Minimum	1.20	0.49	0.99	0.05
Maximum	12.86	5.45	9.01	1.26
1er Quartile	2.17	0.88	1.66	0.18
Médiane	2.76	1.16	2.04	0.27
3ème Quartile	4.15	1.57	3.05	0.44
Moyenne	3.34	1.43	2.46	0.36
Ecart-type	1.79	0.85	1.16	0.27

(d) distances GH et NH de REU01 par rapport à QualiFNIRS sans REU01. (g) distances GH et NH de REU01 par rapport à QualiFNIRS après enrichissement partiel.

La comparaison des distances spectrales GH et NH du jeu de données REU01 avant et après l'ajout de 79 échantillons supplémentaires, de même nature, dans la base QualiFNIRS montre une forte diminution des distances globales et de voisinage. Pour le GH, après l'enrichissement, la quasi-totalité des échantillons ont des valeurs inférieures à la valeur limite de 3. De même, pour les NH où la quasi-totalité des échantillons ont des valeurs inférieures à la limite de 0.6.

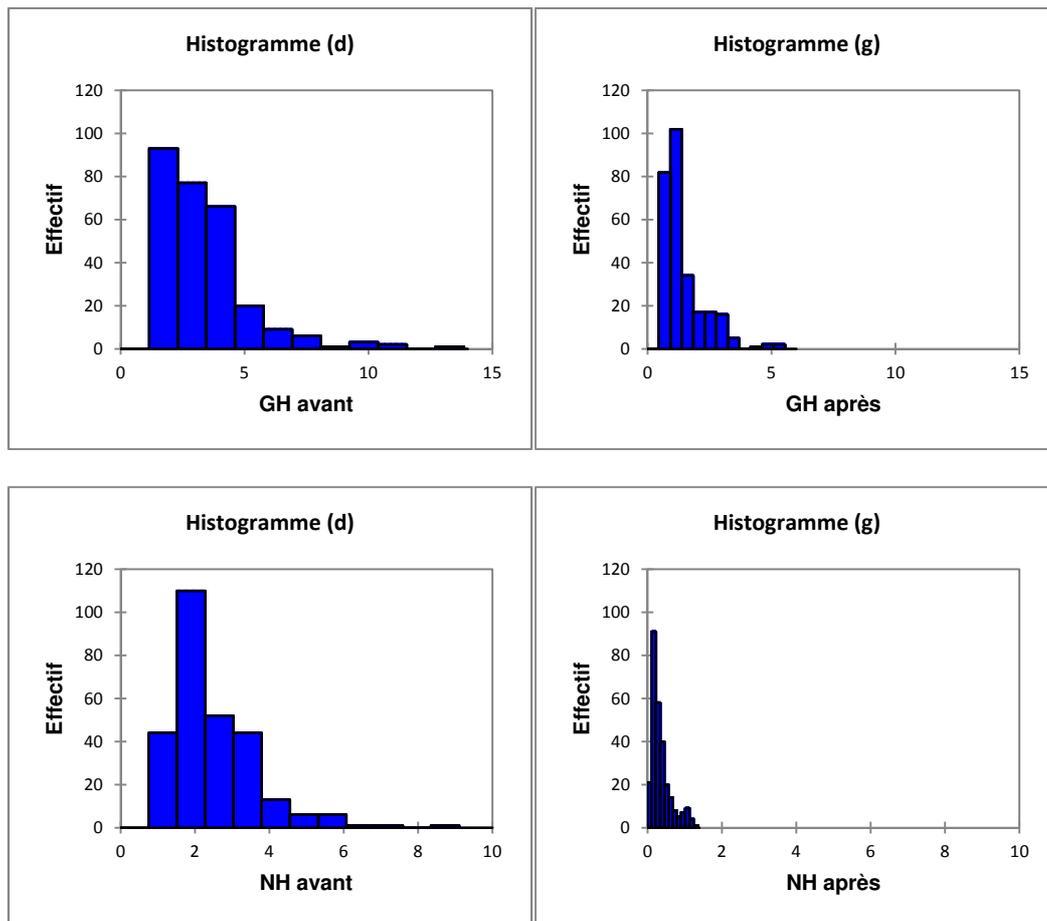


Figure 4. Histogrammes de distribution des GH et NH du jeu de données REU01 par rapport à la base QualiFNIRS avant et après enrichissement partiel

Ces résultats montrent qu'avec seulement 79 échantillons ajoutés à la base QualiFNIRS, les modèles actualisés gagnent suffisamment de variabilité spectrale pour être capables de prédire de manière cohérente un nouveau jeu de données de même nature.

Cette capacité d'apprentissage des modèles, couplée à l'amélioration des biais et des pentes, montre l'intérêt d'intégrer régulièrement de nouveaux jeux de données à la base.

5.2.3.2 Correction des biais et pentes avec enrichissement partiel de la base QualiFNIRS

Les résultats des comparaisons des prédictions du jeu de données REU01 avant et après enrichissement partiel de QualiFNIRS pour MAT et FDA des régimes sont résumés dans le Tableau 7 et la Figure 5.

Tableau 7. Comparaison des prédictions par SPIR fécale de MAT et de FDA des régimes du jeu de données REU01 avant et après enrichissement partiel de QualiFNIRS

		SEC	R ² _{cal}	Nb.val	SEP	R ² _{val}	Biais	Pente
MATrat	(d)	1.51	0.87	357	1.79	0.22	2.87	0.32
(%MS)	(g)	1.48	0.87	278	1.32	0.26	-0.31	0.50
FDArat	(d)	2.53	0.82	357	4.18	0.04	-5.47	0.16
(%MS)	(g)	2.52	0.83	278	2.59	0.23	-0.02	0.70

SEC = écart-type résiduel de l'étalonnage ; R²_{cal} = coefficient de détermination de l'étalonnage ; Nb.val. = nombre d'échantillons de la population de validation ; SEP = écart-type résiduel de validation ; R²_{val} = coefficient de détermination de la validation. (d) prédiction de REU01 avec QualiFNIRS sans REU01. (g) prédiction de REU01 avec QualiFNIRS après enrichissement partiel.

Les résultats du Tableau 7 montrent une nette diminution des SEP après enrichissement, correspondant à une amélioration des SEP de 26% pour les MAT et de 38% pour les FDA. De même, l'enrichissement avec environ 20% de nouveaux individus permet de réduire fortement les biais et d'augmenter les coefficients de pente des étalonnages lorsque l'on veut prédire un jeu de données de même nature.

Ces résultats confirment encore une fois l'importance d'inclure régulièrement des nouveaux jeux de données dans la base QualiFNIRS pour augmenter la variabilité globale de la base et sa robustesse.

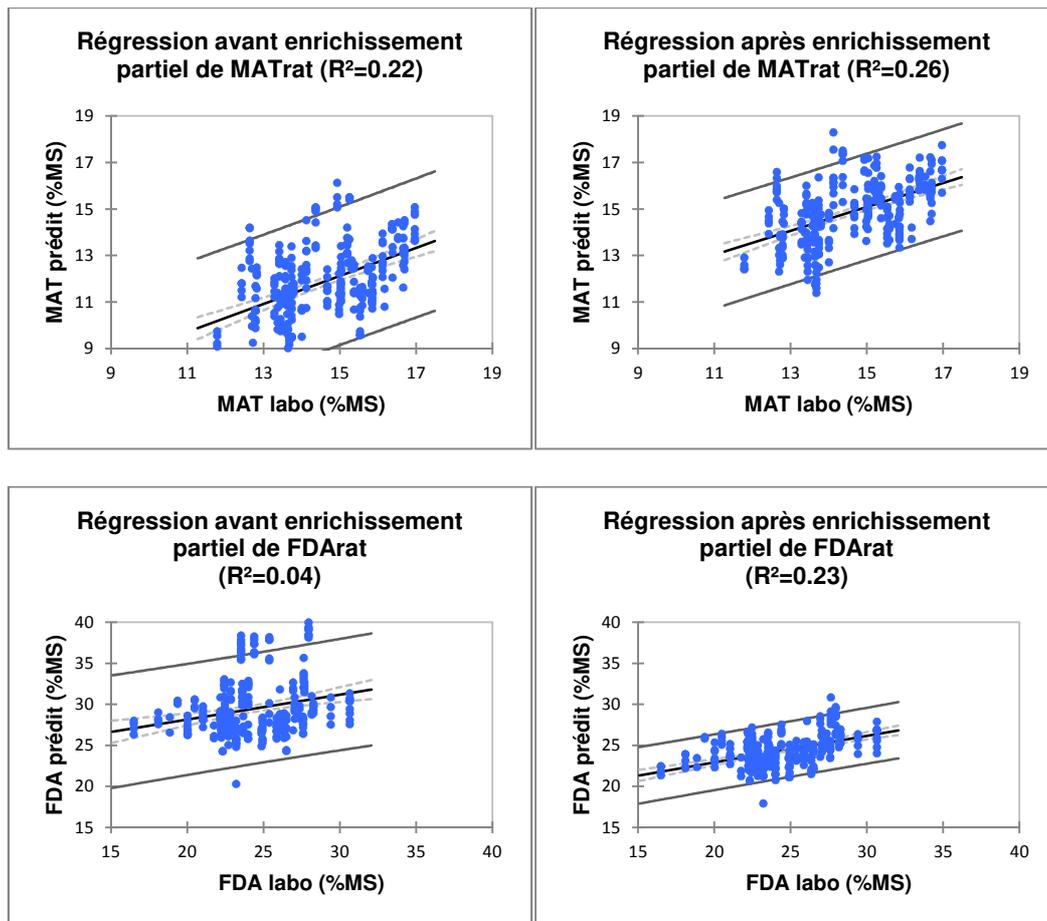


Figure 5. Régressions linéaires entre les valeurs prédites par SPIR fécale et les valeurs de référence des MAT et FDA des régimes pour REU01 avant et après enrichissement partiel

5.3. EXPLORATION COMPLEMENTAIRE DE LA BASE QUALIFNIRS : PREDICTION DE LA COMPOSITION BOTANIQUE ET DE LA PROPORTION DE CONCENTRE

Lors de la collecte et du rassemblement des données pour construire la base QualifNIRS, nous avons pu obtenir pour chaque échantillon de fèces les proportions de graminées, de légumineuses, de ligneux/plantes arbustives et de concentré que contient l'échantillon de régime apparié.

Bien que l'étude soit centrée sur la prédiction de la composition chimique des régimes par SPIR fécale, nous avons testé le potentiel de notre base QualifNIRS pour prédire ces quatre composantes des régimes. Les résultats des étalonnages SPIR sont présentés dans le Tableau 8 et la Figure 6.

Des bonnes précisions ont été obtenues pour les différentes fractions prédites avec des R^2_{cal} proches ou supérieurs à 0.9. Les SECV sont assez proches des SEC ce qui signifie qu'en validation croisée il y a peu d'échantillons aberrants. Des valeurs similaires de SECV et de R^2_{cv} ont été obtenues pour les prédictions des quantités de concentré par SPIR fécale chez des brebis (Núñez-Sánchez *et al.*, 2016) et chez des chèvres (Landau *et al.*, 2004).

Tableau 8. Description statistique des étalonnages QualiFNIRS de prédiction de la composition botanique et de la proportion de concentré des régimes à partir des fèces

	Nb.	Moyenne	Ecart-type	SEC	R^2_{cal}	SECV	R^2_{cv}
% Graminées	1375	54.38	16.22	6.58	0.84	7.35	0.79
% Légumineuses	1335	1.55	4.90	1.28	0.93	1.44	0.91
% Ligneux/arbustives	1339	0.84	2.74	1.17	0.82	1.32	0.77
%Concentré	1370	40.37	22.83	5.72	0.94	6.32	0.92

Nb. = nombre d'échantillons de la population conservée pour l'étalonnage ; SEC = écart-type résiduel de l'étalonnage ; R^2_{cal} = coefficient de détermination de l'étalonnage ; SECV = écart-type résiduel de la validation croisée ; R^2_{cv} = coefficient de détermination de la validation croisée

Les régressions linéaires présentées dans la Figure 6 montrent qu'il y a peu de régimes qui contiennent des légumineuses ou des ligneux/arbustives ce qui se traduit par de mauvaises prédictions en validation avec des R^2 beaucoup plus faibles que les R^2_{cv} .

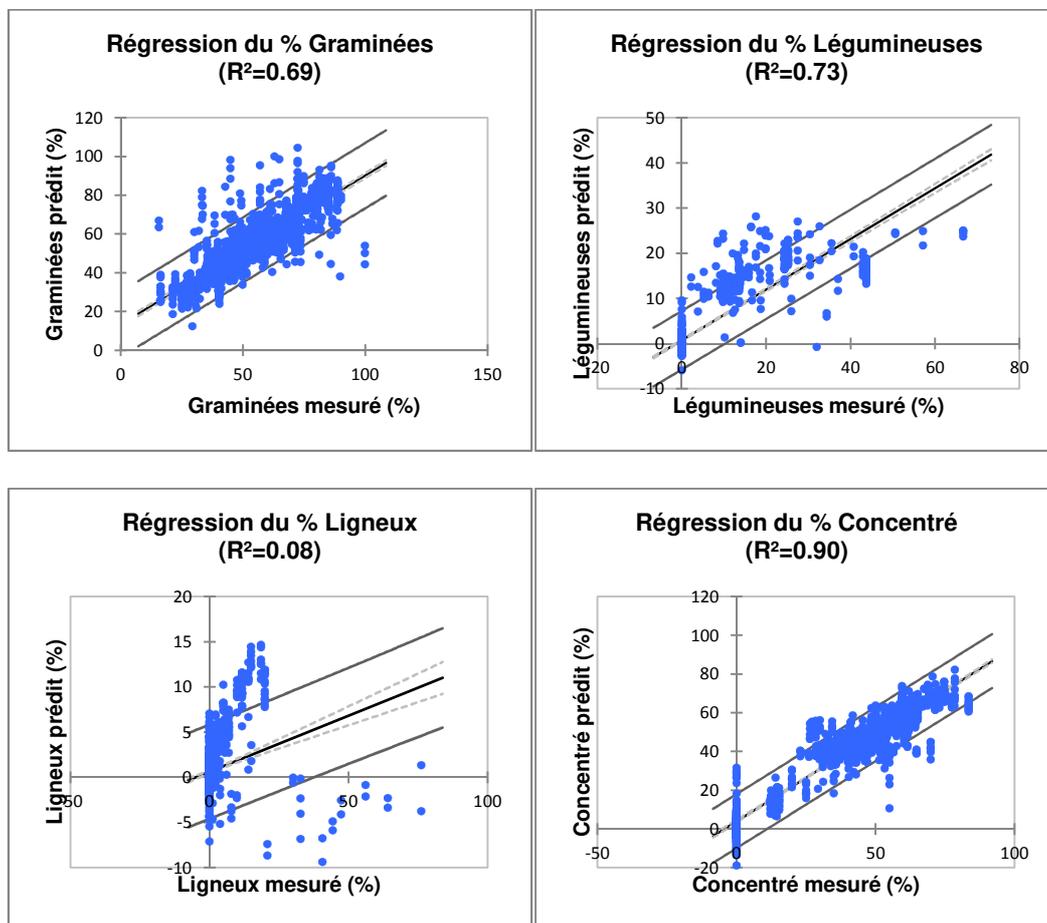


Figure 6. Régressions linéaires entre les valeurs prédites par SPIR fécale et les valeurs mesurées des pourcentages de graminées, de légumineuses, de ligneux/plantes arbustives et de concentré dans les régimes

Ceci dit, malgré la faiblesse de la qualité des prédictions pour les légumineuses et les ligneux/arbustives, il est intéressant de noter que lorsque l'on additionne les prédictions obtenues avec les étalonnages SPIR des 4 composantes prédites individuellement, plus de 90% des sommes obtenues sont comprises entre 90 et 110% (Tableau 9 et Figure 7).

Ceci montre la cohérence des prédictions obtenues avec les étalonnages actuels de la base QualiFNIRS pour prédire les compositions botaniques et les proportions en concentré des rations et ce malgré la faiblesse et le manque de robustesse des étalonnages pour les légumineuses et les ligneux/arbustives.

Tableau 9. Description statistique des reconstitutions des rations avec les prédictions des différentes composantes des rations de la base QualiFNIRS

	Reconstitution de la ration ⁽¹⁾ (%)
Nb. d'obs.	1469
Minimum	58.2
Maximum	123.9
1er Quartile	97.4
Médiane	99.6
3ème Quartile	101.5
Moyenne	98.8
Ecart-type	5.7

(1) somme des prédictions des % de graminées, légumineuses, ligneux/arbustives et concentré

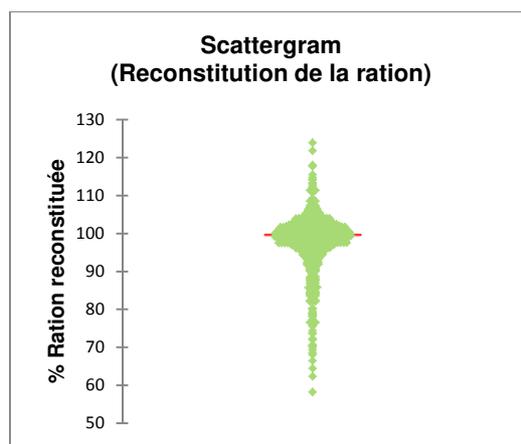


Figure 7. Représentation graphique de la répartition des pourcentages de ration reconstituée par la somme des prédictions des différentes composantes de la ration

Etre capable de prédire par SPIR fécale la composition botanique ou la proportion de concentré du régime ingéré par l'animal en complément de la prédiction la composition chimique apporte une aide supplémentaire pour une meilleure compréhension du comportement alimentaire des animaux et de la gestion de l'espace par ces animaux en libre pâture.

De même, pouvoir accéder à la proportion de concentré des régimes consommés par les bovins par une simple analyse spectrales des fèces peut permettre d'apporter une aide à la décision et du conseil aux éleveurs pour une meilleure utilisation des concentrés.

6. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus avec la base QualiFNIRS ont confirmé qu'il y avait bien dans les spectres fécaux des informations sur certaines caractéristiques des régimes ingérés, permettant d'envisager l'utilisation des fèces comme indicateurs de l'alimentation.

Cette base de données a permis d'obtenir des étalonnages de prédiction de la composition chimique des régimes ingérés avec une précision assez faible, même si elle reste dans les ordres de grandeur rapportés dans la littérature. Plusieurs facteurs peuvent expliquer le manque de précision constaté à ce stade. En effet, par construction, les jeux de données qui la composent sont très variables de par la nature des échantillons comme des conditions expérimentales dont ils sont issus :

Pour les données spectrales comme nous l'avons vu précédemment, presque chaque jeu de données a été saisi avec un spectromètre différent et des méthodologies de prises de spectres différentes. Tous les spectres des échantillons de l'étude ont été acquis sous forme séchés et broyés. Chaque jeu de donnée a été préparé localement avec : des modes de séchage variables (séchage partiel au soleil ou à l'étuve à des températures comprises entre 55 et 65°C), et des broyages à 1mm avec des broyeurs de types et de marques différents ce qui se traduit par des distributions de taille de particules variables en fonction des broyeurs. Or, la granulométrie est un des facteurs majeur qui fait varier le spectre PIR. Ensuite, les spectres des échantillons de chaque jeu de données ont été saisis sur des spectromètres différents. Les différences entre spectromètres induisent des biais sur les prédictions, nous avons donc appliqué une standardisation (méthode de correction du biais) pour rendre les spectres compatibles entre eux. La standardisation corrige les biais mais ne corrige pas les différences spectrales dues au mode de séchage ou à la granulométrie ce qui permet de conserver cette variabilité qui est importante pour augmenter la robustesse des modèles d'étalonnages.

Pour les valeurs de référence dans certains cas, elles ont été mesurées chimiquement mais dans des laboratoires différents qui utilisent des protocoles différents. Bien que tous les laboratoires utilisent les mêmes méthodes, chacun va adapter ses protocoles en fonction de ses équipements et de ses conditions de travail ce qui va induire des erreurs de laboratoire (SEL) variables. Un travail d'harmonisation des protocoles pourrait être réalisé et des circuits de comparaison inter-laboratoire organisés pour connaître les erreurs de chaque laboratoire pour chacun des paramètres et identifier les sources d'erreurs à corriger. Dans d'autres cas, les valeurs chimiques de références ont été obtenues par prédictions à partir de modèles PIR entachés donc de leur propre erreur de prédiction. Dans les cas où ce sont des valeurs de prédictions PIR qui ont été utilisées comme valeurs chimiques de référence, les bases d'étalonnages utilisées étaient des bases de plusieurs milliers d'échantillons, dont la précision et la robustesse permettaient d'obtenir des valeurs de prédictions avec des erreurs (SEP) proches des erreurs de laboratoire (SEL).

Enfin, un facteur de variabilité important reste la méthode de collecte et de reconstitution des régimes soit par méthode directe soit par méthode indirecte. La méthode directe de collecte à l'auge bien que plus facile et plus précise pour reconstituer les régimes, présente le désavantage qu'elle n'est pas représentative de la qualité de l'ingéré sur parcours. Tenter de simuler la sélectivité exercée sur les espèces végétales par l'animal pour être plus représentatif

de ce que l'animal consomme réellement est l'objectif des méthodes indirectes de collecte et de reconstitution des régimes. Cependant, ces méthodes basées sur l'observation directe des animaux sont d'une part lourdes à mettre en œuvre et d'autre part leur précision est très dépendante de la qualité de l'observateur et de sa capacité à estimer et à reproduire correctement la qualité et la quantité des bouchées de l'animal.

Un autre facteur de variabilité potentiel dans notre base mais que nos données ne permettent pas d'explorer systématiquement est l'interaction possible entre fourrages et concentré. Les concentrés ont une trace spectrale forte dans la ration, ils sont digérés plus efficacement que le fourrage et se retrouvent donc moins dans les fèces, mais surtout ils interagissent dans le processus de digestion et induisent donc une utilisation digestive différente de fourrages pourtant semblables. Il serait intéressant de mieux comprendre l'impact de la présence, de la nature et du niveau de concentré dans la ration sur la trace spectrale (des fourrages et des fèces) et donc d'étudier l'effet que cela peut avoir sur les performances des étalonnages. On pourrait alors mettre en place des dispositifs expérimentaux ou des modèles de traitement de données permettant de pallier ce problème.

Un élément que nos résultats ont également démontré est la nécessité d'augmenter la robustesse de la base QualiFNIRS. Si l'on souhaite que cette base soit pleinement opérationnelle, elle doit pouvoir s'appliquer à de nouveaux jeux de données. Les différents essais que nous avons réalisés ont prouvé que pour augmenter la robustesse il était plus important de multiplier l'ajout de nouveaux jeux de données contenant chacun leur propre variabilité plutôt que d'essayer d'ajouter uniquement des jeux de données « standardisés » ayant tous la même variabilité. L'essai de mise à jour avec une sous partie d'une base suggère également qu'il suffit d'un nombre limité d'échantillons pour chaque jeu de données : il vaut donc mieux multiplier des jeux de données de taille modeste que de chercher à produire quelques jeux de données très importants.

Au-delà de l'importance d'augmenter la robustesse de la base, un travail doit être fait pour essayer d'augmenter la précision des étalonnages. Pour cela, il sera nécessaire d'essayer de réduire les erreurs sur les mesures de référence tant au niveau analytique que sur les méthodes de collectes et de reconstitution des régimes. La réflexion autour de la SPIR peut aussi contribuer à améliorer les protocoles de collecte des rations, mais également des fèces puisque Hassoun *et al.* (2013) ont montré que les fèces récoltées à différents moments de la journée peuvent avoir des caractéristiques différentes.

Une autre piste pour améliorer la précision des modèles pourrait être de tester d'autres méthodes de développement des étalonnages tels que par exemple la méthode d'étalonnage « locale » (étalonnage effectué seulement sur les échantillons les plus semblables à l'échantillon à prédire) qui a déjà prouvé son efficacité pour augmenter la précision des prédictions de la qualité des régimes, de leur digestibilité et de l'ingestion (Tran *et al.*, 2010). Cependant pour pouvoir tester la méthode « locale », il est nécessaire au préalable d'augmenter la taille et la variabilité de la base en ajoutant de nouveaux jeux de données.

Parmi les perspectives d'amélioration de la base QualiFNIRS se présente la possibilité d'une part de l'étendre à d'autres paramètres que la composition chimique des régimes tels que les digestibilités *in vitro* et *in vivo*, ou les quantités ingérées. Des premiers essais exploratoires de

prédiction de la composition botanique et des proportions de concentré ont été réalisés et ont pu montrer le potentiel de cette base de données pour ces prédictions et continuerons à être explorés. Un autre développement possible est d'appliquer la méthode à d'autres espèces de ruminants, et même de tester si des bases communes à plusieurs espèces animales sont possibles.

Etre en capacité d'obtenir rapidement et avec précision des informations sur la qualité et la quantité de l'ingéré par des animaux sur parcours ou en libre pâture par une simple collecte de fèces sur le terrain, offre des perspectives importantes de recherches notamment pour des études sur le comportement alimentaire avec des suivis spatio-temporel (Chirat, 2010) ou des études plus écologiques de dynamiques des populations chez par exemple des animaux sauvages (Gaidet, 2005; Cornelis, 2011).

En pratique, les données produites par QualiFNIRS peuvent permettre un suivi de la qualité des parcours ou des pâturages et ainsi mieux comprendre le comportement alimentaire des bovins sur parcours, pour essayer d'agir sur la gestion des itinéraires techniques et adapter la conduite des troupeaux, afin d'optimiser les productions animales tout en assurant une utilisation durable de la ressource (rotations des parcelles).

De même, ces données prédites par SPIR fécale peuvent être intégrées à un logiciel de rationnement et permettre aux techniciens en charge du suivi des exploitations d'obtenir une réponse rapide quant à la qualité des régimes alimentaires consommés. Cette information peut leur permettre d'adopter les bonnes stratégies de rationnement et de complémentations pour ajuster le niveau de production.

7. CONCLUSIONS

Le recensement et le regroupement de huit jeux de données issus de divers programmes de recherche ou travaux de thèse de l'unité SELMET a permis d'initier la mise en œuvre d'un outil SELMET de prédiction par SPIR fécale de la qualité des régimes alimentaires ingérés par les bovins appelé QualiFNIRS.

Avec des performances des étalonnages de prédictions conformes à celles rencontrées dans la littérature, la base QualiFNIRS manque cependant de robustesse. Les différents essais réalisés dans le cadre de ce stage ont pu montrer l'importance d'intégrer régulièrement de nouveaux jeux de données pour augmenter la variabilité de la base, en incluant également de la variabilité en termes de conditions de mesures, d'origines géographiques ou de saisonnalités.

D'ores et déjà, de nouveaux jeux de données sont en cours de constitution dans le cadre de travaux de thèses dans l'unité SELMET et vont être intégrés prochainement à l'outil.

La mise en place de l'outil QualiFNIRS dans le cadre de ce stage de Master n'est que le démarrage du développement de cette approche pour l'unité SELMET. Les premiers essais exploratoires de prédiction de la composition botanique et de la proportion de concentré montrent le potentiel de cette base de données qui sera complétée aussi par des mesures de digestibilité et d'ingestion et étendu également à d'autres espèces animales.

8. BIBLIOGRAPHIE

Agreil C and Meuret M 2004. An improved method for quantifying intake rate and ingestive behaviour of ruminants in diverse and variable habitats using direct observation. *Small Ruminant Research* 54, 99-113.

Andueza D, Picard F, Aufrère J, Jamot J, Bechet G and Baumont R 2013. Polyethylene glycol determined by near-infrared reflectance spectroscopy to estimate faecal output in sheep fed fresh permanent grassland forage. *Livestock Science* 155, 38-43.

Assouma MH 2016. Approche écosystémique du bilan des gazs à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien : contribution de l'élevage. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris.

Aufrère J, Baumont R, Delaby L, Peccatte JR, Andrieu J, Andrieu JP and Dulphy JP 2007. Prédiction de la digestibilité des fourrages par la méthode pepsine-cellulase. Le point sur les équations proposées. *INRA Productions Animale - Paris* 20, 129-135.

Aufrère J, Graviou D, Demarquilly C, Perez JM and Andrieu J 1996. Near infrared reflectance spectroscopy to predict energy value of compound feeds for swine and ruminants. *Animal Feed Science and Technology* 62, 77-90.

Bastianelli D, Bonnal L, Jaguelin-Peyraud Y and Noblet J 2015. Predicting feed digestibility from NIRS analysis of pig faeces. *Animal* 9, 781-786.

Bastianelli D, Bonnal L, Juin H, Mignon-Grasteau S, Davrieux F and Carré B 2010. Prediction of the chemical composition of poultry excreta by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 18, 69-77.

Bastianelli D, Fermet-Quinet E, Davrieux F, Friot D and Hervouet C 2007. Use of near infrared spectroscopy for the prediction of quality of poultry feeds in East Africa. *Near infrared spectroscopy : Proceedings of the 12th International Conference, Auckland, New Zealand, 9th - 15th April 2005*. Burling-Claridge G.R. (ed.), Holroyd S.E. (ed.), Sumner R.M.W. (ed.). NIRCE. Chichester : IM Publications, 623-625.

Bastianelli D, Muley N, Carré B, Bonnal L and Davrieux F 2004. Use of near infrared spectroscopy for evaluation of nutrient digestibility for genetic experiments in poultry. *Near Infrared Spectroscopy: Proceedings of the 11th International Conference, Ed by Davies A.M.C., Garrido-Varo A., NIR Publications, Chichester, UK, 735-738*.

Batten GD 1998. Plant analysis using near infrared reflectance spectroscopy: the potential and the limitations. *Animal Production Science* 38, 697-706.

Chirat G 2010. Description et modélisation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours, en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat, Montpellier SupAgro, Montpellier.

Coates DB 2000. Faecal NIRS - what does it offer today's grazier? *Tropical Grasslands* 34, 230-239.

Coates DB and Dixon RM 2008. Development of near infrared analysis of faeces to estimate non-grass proportions in diets selected by cattle grazing tropical pastures. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 16, 471-480.

Coleman SW, Stuth JW and Holloway JW 1995. Prediction of intake by near-infrared spectroscopic analysis of fecal samples. *Proceedings of the Symposium: Intake by Feedlot Cattle*. Oklahoma Agricultural Experiment Station P-942, Stillwater, OK, 145-155.

Cornelis D 2011. Ecologie du déplacement du buffle de savane ouest-africain (*Syncerus caffer brachyceros*). Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2 - Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

Coulibaly I, Métayer JP, Chartrin P, Mahaut B, Bouvarel I, Hogrel P and Bastianelli D 2013. Combination of information from feeds and feces improves the NIRS prediction of digestibility in broilers. *Actes des 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras du 26 au 28 mars, 2013, La Rochelle, France*, 640-644.

Cozzolino D, La Manna A and Vaz Martins D 2002. Use of near infrared reflectance spectroscopy to analyse bovine faecal samples. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 10, 309-314.

Cozzolino D and Labandera M 2002. Determination of dry matter and crude protein contents of undried forages by near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82, 380-384.

Curtis KMS, Holst PJ and Murray PJ 1994. Measuring supplement intake in the field using ytterbium as a marker. *Animal Production Science* 34, 339-343.

De Boever JL, Cottyn BG, De Brabander DL, Vanacker JM and Boucqué CV 1996. Prediction of the feeding value of grass silages by chemical parameters, in vitro digestibility and near-infrared reflectance spectroscopy. *Animal Feed Science and Technology* 60, 103-115.

de Garine-Wichatitsky M, Lecomte P, Soubeyran Y, Guérin H, Maillard D, Duncan P and Toutain B 2002. Régime alimentaire et profils nutritionnels fécaux: mises au point méthodologiques sur ruminants sauvages et domestiques de Nouvelle Calédonie. *Neuvièmes rencontres autour des recherches sur les ruminants*. INRA, Institut de l'élevage, Paris, 306.

Decruyenaere V, Froidmont E, Bartiaux-Thill N, Buldgen A and Stilmant D 2012. Faecal near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) compared with other techniques for estimating the in vivo digestibility and dry matter intake of lactating grazing dairy cows. *Animal Feed Science and Technology* 173, 220-234.

Decruyenaere V, Lecomte P, Demarquilly C, Aufrere J, Dardenne P, Stilmant D and Buldgen A 2009. Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): Developing a global calibration. *Animal Feed Science and Technology* 148, 138-156.

Decruyenaere V, Peters M, Stilmant D, Dardenne P and Buldgen A 2004. Near infrared spectroscopy applied to faeces to predict botanical composition of sheep intake. *Near Infrared Spectroscopy: Proceedings of the 11th International Conference*, Ed by Davies A.M.C., Garrido-Varo A., NIR Publications, Chichester, UK, 725-730.

Dixon R and Coates D 2009. Near infrared spectroscopy of faeces to evaluate the nutrition and physiology of herbivores. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 17, 1-31.

Dixon R, Coates D and Jackson D 2010. Utilizing faecal near infrared spectroscopy to improve nutritional management of grazing cattle in the tropics of northern Australia. *Advances in Animal Biosciences* 1, 432.

Doyle PT, Casson T, Cransberg L and Rowe JB 1994. Faecal output of grazing sheep measured by total collection or using chromium sesquioxide. *Small Ruminant Research* 13, 231-236.

Flinn PC, Edwards NJ, Oldham CM and McNeill DM 1996. Near infrared analysis of the fodder shrub tagasaste (*Chamaecytisus proliferus*) for nutritive value and anti-nutritive factors. Davies, A.M.C., Williams, P.C. (Eds.), *Near Infrared Spectroscopy: The Future Waves*. NIR Publications, Chichester, UK, 576-580.

Gaidet N 2005. Etude de la dynamique des populations d'ongulés en zone tropicale: contribution du modèle d'une population exploitée d'impalas (*Aepyceros melampus*). Thèse de doctorat, Lyon 1, Lyon.

Garnsworthy PC and Unal Y 2004. Estimation of dry-matter intake and digestibility in group-fed dairy cows using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal Science* 79, 327-334.

Givens DI and Deaville ER 1999. The current and future role of near infrared reflectance spectroscopy in animal nutrition: a review. *Australian Journal of Agricultural Research* 50, 1131-1145.

Glasser T, Landau S, Muklada H, Dvash L, Perevolotsky A and Ungar ED 2007. Monitoring diet composition and quality of ranging goats by faecal NIRS. *Options Méditerranéennes, Series A* 74, 243-248.

Glasser T, Landau S, Ungar ED, Perevolotsky A, Dvash L, Muklada H, Kababya D and Walker JW 2008. A fecal near-infrared reflectance spectroscopy-aided methodology to determine goat dietary composition in a Mediterranean shrubland. *Journal of Animal Science* 86, 1345-1356.

Guérin H, Richard D, Friot D and Mbaye N 1986. Les choix alimentaires des bovins et ovins sur pâturages sahéliens. *Reproduction, Nutrition, Développement* 26, 269-270.

Hassoun P, Bastianelli D, Foulquié D, Bonnal L and Bocquier F 2016. Polyethylene glycol marker measured with NIRS gives a reliable estimate of the rangeland intake of grazing sheep. *Animal* 10, 771-778.

Hassoun P, Viudes G, Autran P, Bastianelli D and Bocquier F 2013. A method for estimating dry forage intake by sheep using polyethylene glycol as a faecal marker measured with NIRS. *Animal* 7, 1280-1288.

Hellwing ALF, Lund P, Weisbjerg MR, Oudshoorn FW, Munksgaard L and Kristensen T 2015. Comparison of methods for estimating herbage intake in grazing dairy cows. *Livestock Science* 176, 61-74.

Huntington GB, Leonard ES and Burns JC 2011. Technical note: Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict intake and digestibility in bulls and steers. *Journal of Animal Science* 89, 1163-1166.

Jobin M 2012. Estimations indirectes des émissions de méthane et productivité des systèmes herbagers guyanais. Stage 2A, année de césure, INP-ENSAT, Toulouse (France), 56.

Kaneko H and Lawler IR 2006. Can near infrared spectroscopy be used to improve assessment of marine mammal diets via fecal analysis? *Marine Mammal Science* 22, 261-275.

Keli A, Andueza D, de Vega A and Guada JA 2008. Validation of the n-alkane and NIRS techniques to estimate intake, digestibility and diet composition in sheep fed mixed lucerne: ryegrass diets. *Livestock Science* 119, 42-54.

Kneebone DG and Dryden GM 2015. Prediction of diet quality for sheep from faecal characteristics: comparison of near-infrared spectroscopy and conventional chemistry predictive models. *Animal Production Science* 55, 1-10.

Landau S, Friedman S, Devash L and Mabeesh SJ 2002. Polyethylene glycol, determined by near-infrared reflectance spectroscopy, as a marker of fecal output in goats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 1374-1378.

Landau S, Glasser T and Dvash L 2006. Monitoring nutrition in small ruminants with the aid of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) technology: A review. *Small Ruminant Research* 61, 1-11.

Landau S, Glasser T, Dvash L and Perevolotsky A 2004. Faecal NIRS to monitor the diet of Mediterranean goats. *South African Journal of Animal Science* 34, 76-80.

Lecomte P, Dardenne P and Clément C 1996. La spectrométrie dans le proche infrarouge, outil d'évaluation rapide de la qualité et de la production du fourrage frais. *Fourrages* 148, 379-387.

Leite ER and Stuth JW 1995. Fecal NIRS equations to assess diet quality of free-ranging goats. *Small Ruminant Research* 15, 223-230.

Li C, Alatengdalai A, Xue S, Tajima A and Ishikawa N 2015. Estimation of herbage intake and digestibility of grazing sheep in Zhenglan Banner of Inner Mongolia by using n-alkanes. *Animal Nutrition* 1, 324-328.

Lopes Galasso H, Callier MD, Bastianelli D, Blancheton JP and Aliaume C 2017. The potential of near infrared spectroscopy (NIRS) to measure the chemical composition of aquaculture solid waste. *Aquaculture* 476, 134-140.

Lyons RK and Stuth JW 1992. Fecal NIRS equations for predicting diet quality of free-ranging cattle. *Journal of Range Management* 45, 238-244.

Maillard D, Bastianelli D, Tronchot M, Bonnal L, Cugnasse JM, Marty E and Garel M 2005. Evaluation de l'utilisation de la spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) pour l'estimation de l'évolution de la qualité du régime alimentaire du mouflon. Rapport Scientifique de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, 49-52.

Malossini F, Bovolenta S, Piasentier E, Piras C and Martillotti F 1996. Comparison of n-alkanes and chromium oxide methods for estimating herbage intake by grazing dairy cows. *Animal Feed Science and Technology* 61, 155-165.

Mancilla-Leytón JM, Joffre R and Martín Vicente A 2014. Effect of grazing and season on the chemical composition of Mediterranean shrub species in Doñana Natural Park, Spain. *Journal of Arid Environments* 108, 10-18.

Mayes RW, Lamb CS and Colgrove PM 1986. The use of dosed and herbage n-alkanes as markers for the determination of herbage intake. *The Journal of Agricultural Science* 107, 161-170.

Meuret M, Bartiaux-Thill N, Bourbouze A, Rosenberger S, Vernerey M, Sourbier Y, Ninane V, Trojan M, Trojan M and Rouchy N 1985. Evaluation de la consommation d'un troupeau de chèvres laitières sur parcours forestier--Méthode d'observation directe des coups de dents--Méthode du marqueur oxyde de chrome. *Annales de Zootechnie* 34, 159-180.

Meuret M, Dardenne P, Biston R and Poty O 1993. The use of NIR in predicting nutritive value of Mediterranean tree and shrub foliage. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 1, 45-54.

Norris KH, Barnes RF, Moore JE and Shenk JS 1976. Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Animal Science* 43, 889-897.

Núñez-Sánchez N, Carrion D, Peña Blanco F, Domenech García V, Garzón Sigler A and Martínez-Marín AL 2016. Evaluation of botanical and chemical composition of sheep diet by using faecal near infrared spectroscopy. *Animal Feed Science and Technology* 222, 1-6.

Núñez-Sánchez N, Martínez Marín AL, Hernández MP, Carrion D, Castro GG and Pérez Alba LM 2012. Faecal near infrared spectroscopy (NIRS) as a tool to assess rabbit's feed digestibility. *Livestock Science* 150, 386-390.

Oliván M, Ferreira LMM, Celaya R and Osoro K 2007. Accuracy of the n-alkane technique for intake estimates in beef cattle using different sampling procedures and feeding levels. *Livestock Science* 106, 28-40.

Ottavian M, Franceschin E, Signorin E, Segato S, Berzaghi P, Contiero B and Cozzi G 2015. Application of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) on faecal samples from lactating dairy cows to assess two levels of concentrate supplementation during summer grazing in alpine pastures. *Animal Feed Science and Technology* 202, 100-105.

Park RS, Gordon FJ, Agnew RE, Barnes RJ and Steen RWJ 1997. The use of Near Infrared Reflectance Spectroscopy on dried samples to predict biological parameters of grass silage. *Animal Feed Science and Technology* 68, 235-246.

Reis SF, Huntington G, Hopkins M, Whisnant S and Paulino PVR 2015. Herbage selection, intake and digestibility in grazing beef cattle. *Livestock Science* 174, 39-45.

Schiborra A, Bulang M, Berk A, Susenbeth A and Schlecht E 2015. Using faecal near-infrared spectroscopy (FNIRS) to estimate nutrient digestibility and chemical composition of diets and faeces of growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 210, 234-242.

SELMET 2007. La spectroscopie dans le proche infrarouge. Laboratoire d'alimentation animale, CIRAD , 4 pp.

Shenk JS and Westerhaus MO 1991. New standardization and calibration procedures for NIRS analytical systems. *Crop Science* 31, 1694-1696.

Sinnaeve G, Dardenne P, Agneessens R and Biston R 1994. The use of near infrared spectroscopy for the analysis of fresh grass silage. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 2, 79-84.

Steyaert SMJG, Hütter FJ, Elfström M, Zedrosser A, Hackländer K, Lê MH, Windisch WM, Swenson JE and Isaksson T 2012. Faecal spectroscopy: A practical tool to assess diet quality in an opportunistic omnivore. *Wildlife Biology* 18, 431-438.

Stuth J, Jama A and Tolleson D 2003. Direct and indirect means of predicting forage quality through near infrared reflectance spectroscopy. *Field Crops Research* 84, 45-56.

Tellado S and Azorit C 2015. An integrative assay to quantify the nutritional quality of the selected diet of two Mediterranean free-living deer by faecal-FT-NIRS. *Animal Production Science* 55, 11-16.

Tilley JMA and Terry RA 1963. A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *Grass and Forage Science* 18, 104-111.

Tran H 2009. Qualification en spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) de l'azote et des fibres des ressources alimentaires et de leur utilisation digestive par le bétail laitier en milieux tropicaux (Réunion-Vietnam). Thèse de doctorat, Université de La Réunion, France.

Tran H, Salgado P, Tillard E, Dardenne P, Nguyen XT and Lecomte P 2010. "Global" and "local" predictions of dairy diet nutritional quality using near infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Dairy Science* 93, 4961-4975.

Van Soest PJ, Robertson JB and Lewis BA 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74, 3583-3597.

Walker JW, Clark DH and McCoy SD 1998. Fecal NIRS for predicting percent leafy spurge in diets. *Journal of Range Management* 51, 450-455.

White M and Rouvinen-Watt K 2004. Near-infrared evaluation of wet mink diets. *Animal Feed Science and Technology* 111, 239-246.

Wold S, Ruhe A, Wold H and Dunn WJ 1984. The collinearity problem in linear regression. The partial least squares (PLS) approach to generalized inverses. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 5, 735-743.