
Estimation de l'ingestion chez le taurillon Blanc Bleu Belge culard par spectroscopie proche infrarouge appliquée aux matières fécales

Auteur : Albanese, Maxime

Promoteur(s) : 879

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9628>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**ESTIMATION DE L'INGESTION CHEZ LE
TAURILLON BLANC BLEU BELGE CULARD
PAR SPECTROSCOPIE PROCHE
INFRAROUGE APPLIQUÉE AUX MATIÈRES
FÉCALES**

MAXIME ALBANESE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR : BECKERS YVES

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**ESTIMATION DE L'INGESTION CHEZ LE
TAURILLON BLANC BLEU BELGE CULARD
PAR SPECTROSCOPIE PROCHE INFRAROUGE
APPLIQUÉE AUX MATIÈRES FÉCALES**

MAXIME ALBANESE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR : BECKERS YVES

Remerciements

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail de fin d'études.

Tout d'abord, je remercie Monsieur Beckers, mon promoteur, qui toujours été disponible et présent pour m'aider à mener à bien ce travail.

Je remercie également Madame Virginie Decruyenaere, avec qui les modèles infrarouges utilisés lors de ce travail ont été établis et qui a toujours su faire preuve d'une grande pédagogie lors de ses explications sur cette technique qui m'était inconnue.

Ensuite, je souhaite remercier Monsieur Jean-Marc Bourguignon, qui s'est lui aussi toujours montré très disponible et présent dans le suivi de cette expérimentation. Qui a pu dans un timing assez serré, fournir une thématique originale sur laquelle travailler, ainsi que le matériel animal et les aliments nécessaires à la réalisation d'un telle expérimentation.

. Merci à Sylvie pour son excellent accueil à la ferme et au bureau, pour ses conseils, ses encouragements permanents et sa bonne humeur.

Merci à François, qui a rendu ces heures de travail agréables, et les pauses café tout autant.

Merci à la firme AGROPES, de nous avoir gracieusement prêté une bascule a bovins pendant toute la durée de cette expérience.

Je remercie également mon ami Slash, avec qui j'ai passé de longues soirées de travail au bureau de zootechnie, qui a pris de son temps pour relire ce travail et me donner de nombreux conseils de rédaction. Merci aussi à Kevin, Nassim et Martin pour leur aide.

Merci à tous mes amis Gembloutois, rencontrés au fil de ces années... Merci à mes amis des équipes bar, du comité AG 2016 et de la section agro. Merci spécial à tous mes colocataires du kot Cénobite, où nous avons pu là aussi faire d'agréables essais zootechniques. Merci surtout à Augustin Tèrassè, que j'ai eu la chance de côtoyer depuis mon arrivée à Gembloux.

Je remercie évidemment ma famille. Mes parents qui m'ont toujours soutenu et cru en moi, même dans les moments moins faciles. Dominique et Marine qui ont toujours réussi à trouver les sources de motivation nécessaires pendant les blocus. Quel bonheur d'avoir pu grandir à vos côtés.

Enfin, merci à Florentine, pour toujours avoir été à mes côtés, pour ton soutien indéfectible et ton aide durant la réalisation de ce travail.

Résumé :

Les bovins en engraissement logés en groupes partagent la même auge. Le calcul de l'ingestion individuelle de chaque animal est donc difficile à mettre en place dans ces conditions d'élevage. Ainsi, lorsque le rapport entre la quantité ingérée par l'animal et son gain de poids (indice de consommation) doit être établi, l'ingestion théorique d'un individu est déterminée en divisant l'ingestion totale du lot par le nombre de taurillons, induisant une erreur dans le calcul de l'indice de consommation, les taureaux d'un même lot n'ingérant pas tous la même quantité d'aliments.

La spectroscopie infrarouge appliquée aux matières fécales de ces taurillons pourrait permettre d'estimer cette ingestion individuelle sans modifier la conduite du lot d'animaux. Cette méthode nécessite la création de modèles de calibration, basés sur un certain nombre de spectres infrarouges associés à des valeurs d'ingestion de référence. Une fois ces calibrations établies, un échantillonnage de fèces d'un taurillon pourrait suffire pour estimer son ingestion individuelle.

Les données nécessaires ont été recueillies durant cette expérimentation, afin d'établir les modèles de calibration. 16 taurillons Blanc Bleu Belges culards ont été logés individuellement et nourris *ad libitum* avec des aliments concentrés et de la paille. Leur ingestion individuelle a été calculée tout au long de l'expérience, durant laquelle des échantillonnages de matières fécales ont été réalisés de façon hebdomadaire.

Les statistiques de calibration obtenues avec les données de cette expérience ne permettent pas une prédiction suffisamment robuste de l'ingestion individuelle ($R^2 = 0,72$; CV = 6,7 % et RPD = 1,46).

Une plus grande variabilité des données de référence permettrait probablement d'améliorer la qualité de ces modèles.

Mots clés

Spectroscopie proche infrarouge – matières fécales - estimation de l'ingestion – Blanc Bleu Belge – taurillons – mash.

Abstract :

Fattening cattle housed in groups share the same trough. Calculating the individual intake of each animal is therefore difficult to implement under these farming conditions. Thus, when the ratio between the quantity ingested by the animal and its weight gain (feed conversion ratio) must be established, the theoretical intake of an individual is determined by dividing the total intake of the batch by the number of bulls, which leads to an error in the calculation of the feed conversion ratio, as not all bulls in the same batch ingest the same quantity of feed.

Infrared spectroscopy applied to the faeces of these young bulls could make it possible to estimate this individual intake without changing the behaviour of the batch of animals. This method requires the creation of calibration models, based on a number of infrared spectra associated with reference intake values. Once these calibrations have been established, a sampling of the faeces of a bull could be sufficient to estimate its individual ingestion.

The necessary data were collected during this experiment in order to establish the calibration models. 16 Belgian Blue bulls were individually housed and fed *ad libitum* with concentrated feed and straw. Their individual intakes were calculated throughout the experiment, during which faecal samples were taken on a weekly basis.

The calibration statistics obtained with the data from this experiment do not allow a sufficiently robust prediction of individual intakes ($R^2 = 0.72$; CV = 6.7% and RPD = 1.46).

Greater variability in the baseline data would likely improve the quality of these models.

Key words

Near infrared spectroscopy – ruminant faeces - feed intake prediction – Belgian Blue – bull calves - mash

Table des matières

Introduction	1
I) Synthèse bibliographique	2
1) Mécanismes de l'ingestion chez le bovin.....	2
1.1) Régulation de l'ingestion.....	3
1.2) Facteurs influençant l'ingestion	5
1.3) Temps de transit des aliments.....	6
1.4) Indice de consommation et residual feed intake.....	7
1.5) Ingestion individuelle chez les ruminants logés et nourris en groupe	8
2) Spectroscopie proche infrarouge.....	12
2.1) Proche infrarouge.....	12
2.2) Calibration.....	13
2.3) Applications	16
3) Objectifs du travail.....	17
II) Matériels et méthodes.....	18
1) Généralités.....	18
2) Matériel animal.....	18
3) Alimentation	19
3.1) Choix des aliments	19
3.2) Distribution des aliments.....	21
4) Logement et contention	23
5) Collecte des données et des échantillons.....	23
5.1) Ingestion journalière	23
5.2) Matières fécales.....	26
5.3) Pesée des animaux	26
6) Traitement des échantillons.....	27
6.1) Matières fécales.....	27
6.2) Mash.....	29
7) Analyses spectrales.....	29
8) Traitement des données	29
8.1) Conditions d'échantillonnage.....	29
8.2) Constitution des paires « spectre infrarouge – valeur de référence ».....	30
8.3) Traitement des données statistiques	33
III) Résultats et discussion.....	34
1) Résumé des exigences	35

1.1)	Mesure de l'ingestion et nombre d'échantillons.....	35
1.2)	Valeur de référence de l'ingestion journalière d'aliment	35
1.3)	Spectre fécal	36
1.4)	Calibration	37
2)	Calcul de l'ingestion et nombre d'échantillons de fèces	38
3)	Variabilité de l'ingestion et poids des animaux	39
3.1)	Ingestion de mash.....	40
3.2)	Ingestion de paille	46
3.3)	Fluctuation journalière de l'ingestion.....	51
4)	Spectres fécaux.....	52
4.1)	Temporalité entre le spectre fécal et l'ingestion de référence	52
4.2)	Caractéristiques du spectre fécal	53
5)	Calibration infrarouge	55
5.1)	Spectres de la base de données infrarouge.....	56
5.2)	Expression de l'ingestion	57
5.3)	Pondération de l'ingestion par le poids	59
5.4)	Temporalité de l'ingestion.....	60
5.5)	Aliments pris en compte.....	61
5.6)	Résumé	62
5.7)	Base de données élargie.....	64
6)	Discussion générale.....	65
6.1)	Nombre de spectres dans la base de données.....	65
6.2)	Variabilité des valeurs de référence	65
6.3)	Précision du calcul des valeurs de référence	66
7)	Conclusion et perspectives	67
IV)	Bibliographie.....	69
V)	Annexes.....	73

Table des Figures

Figure 1: Ingestion de fourrage par le ruminant.....	2
Figure 2: Intensité des signaux stimulateurs et inhibiteurs (a) entre les repas et (b) durant les repas	4
Figure 3: Evolution de l'ingestion de concentré en fonction du poids vif chez le BBBc.....	6
Figure 4: Contribution des différents mécanismes biologiques à la variation de la RFI	8
Figure 5: Imagerie 3 dimensions d'une vache laitière s'alimentant.....	10
Figure 6: Le spectre électromagnétique et les différentes régions de l'infrarouge	12
Figure 7: Prédications FNIRS vs valeurs de référence pour la prédiction de la digestibilité de la protéine par des poulets.....	14
Figure 8: Dispositif expérimental.....	22
Figure 9: Loges individuelles des taurillons	24
Figure 10: Bascule à bovins	27
Figure 11: Cyclotec	28
Figure 12: Mise en cellules des échantillons.....	28
Figure 13 : Evolution de l'ingestion absolue en fonction du poids vif.....	39
Figure 14 : Evolution de l'ingestion relative en fonction du poids vif.....	40
Figure 15 : Evolution du poids vif moyen des taurillons en fonction du mash ingéré.....	43
Figure 16 : Variation journalière de l'ingestion d'un taurillon	52
Figure 17 : Combinaison initiale des modalités	56
Figure 18 : Effet de l'expression des spectres sur la qualité de la prédiction.....	57
Figure 19 : Effet de l'expression de l'ingestion sur la qualité de la prédiction.....	58
Figure 20 : Effet de la pondération de l'ingestion sur la qualité de la prédiction.....	59
Figure 21 : Effet de la temporalité de l'ingestion sur la qualité de la prédiction.....	60

Figure 22 : Effet du choix du type d'aliment sur la qualité de la prédiction	61
Figure 23 : Corrélation entre ingestion prédite et ingestion calculée.....	63

Table des Tableaux

Tableau 1: Composition des 4 groupes expérimentaux	19
Tableau 2: Composition chimique et valeurs nutritives des mashes utilisés (au kg brut)	20
Tableau 3 : Nombre d'échantillons de matières fécales récoltés	38
Tableau 4 : Ingestion absolue en fonction du type de mash et de la période	41
Tableau 5 : Energie nette ingérée en fonction du type de mash et de la période	41
Tableau 6 : p-values des ingestions absolues de mash et d'énergie	42
Tableau 7 : Synthèse des pesées des taurillons par lot	43
Tableau 8 : Ingestion relative (PV) en fonction de la période et du type de mash	44
Tableau 9 : Ingestion relative (PM) en fonction de la période et du type de mash	44
Tableau 10 : p-values des ingestions relatives	45
Tableau 11 : Variabilité de l'ingestion en fonction de son expression	45
Tableau 12 : Prédiction infrarouge du pourcentage de paille dans la ration en fonction du mash	46
Tableau 13 : Comparaison des moyennes de proportion de paille dans la ration, prédites via l'infrarouge	46
Tableau 14 : Comparaison des moyennes de proportion de paille dans la ration, prédites via la MOF	47
Tableau 15 : Quantité de paille ingérée en fonction de la période et du type de mash	49
Tableau 16 : Teneur en mod des mashes et de la paille de froment	49
Tableau 17 : Evolution de l'importance de la paille avant et après digestion	50
Tableau 18 : Evolution de proportion de MO issue de la paille dans la ration et dans les fèces en fonction de l'ingestion de paille	50
Tableau 19 : Valeurs statistiques des analyses d'échantillons étuvés à des heures différentes	54

Tableau 20 : Valeurs statistiques des analyses d'échantillons prélevés à des heures différentes	54
Tableau 21 : Modalités permettant les meilleures calibrations	62
Tableau 22 : Analyse de variance de la précision du modèle utilisé en fonction du type de mash	63
Tableau 23 : Modalités utilisées et indices de qualité du modèle avec base de données élargie	64

Introduction

En Wallonie, le secteur de la viande bovine connaît des moments difficiles. La crise profonde dans laquelle les éleveurs allaitants se trouvent est due à un faible prix de vente des carcasses et à des coûts de production toujours plus élevés (SPF économie, 2019). Plus que jamais, les élevages bovins se doivent d'être performants afin de pouvoir dégager une marge pour les éleveurs. L'efficacité alimentaire des animaux est primordiale quand on sait que le poste de l'alimentation représente 47% des coûts totaux dans la production d'animaux gras (SPF économie, 2019).

La SCAM (Société Coopérative Agricole de la Meuse) est un fabricant wallon d'aliments pour animaux. Elle produit, entre autres, des aliments concentrés pour les bovins viandeux. La viabilité économique d'une telle coopérative passe évidemment par la viabilité économique de ses clients éleveurs. Ainsi, la SCAM investit en recherche et développement afin d'améliorer les performances économiques des éleveurs grâce à une plus grande efficacité alimentaire (SCAM, 2020).

Dans les ateliers d'engraissement, le poids des animaux peut être obtenu grâce à des pesées individuelles. L'ingestion, par contre, ne peut être connue pour chaque animal. En effet, ces derniers sont classiquement logés en lots de plusieurs animaux. La quantité d'aliment distribuée au lot peut être déterminée, mais la part ingérée par chaque animal reste inconnue. Le calcul de l'ingestion individuelle se résume à diviser l'ingestion totale par le nombre d'animaux du lot.

Les indices de consommation calculés pour chaque animal mettent alors en relation leur gain de poids et leur ingestion moyenne théorique, induisant une imprécision sur leur indice de consommation. Bien qu'il existe des dispositifs permettant de nourrir individuellement des animaux logés en groupe, comme les DAC (distributeurs automatiques de concentré), ceux-ci ne sont pas applicables aux exploitations agricoles. Une méthode d'estimation de l'ingestion individuelle d'un animal au sein d'un lot permettrait de connaître de façon plus précise leur véritable indice de consommation.

Depuis longtemps déjà, les éleveurs arrivent à évaluer la digestion de leurs bovins grâce à leurs bouses. L'inspection visuelle et manuelle de bouses fraîches est une source d'informations très intéressante en élevage. La présence de fibres non digérées indique un temps de digestion trop faible ou une indigestibilité de l'aliment. Une bouse trop liquide est un signe de trouble digestif chez le bovin, à l'inverse, une bouse trop solide reflète une ration mal équilibrée (Hulsen, 2013).

La matière fécale n'est certainement pas le produit animal sur lequel il est le plus agréable de travailler. Sa collecte est néanmoins aisée et non-destructive et sa production par les animaux d'élevage est importante. Ainsi, de nombreux travaux s'intéressent aux matières fécales.

La spectroscopie proche infrarouge appliquée aux matières fécales permet, entre autres, d'obtenir des renseignements sur le régime alimentaire des animaux, ainsi que sur la quantité de matière sèche ingérée par ceux-ci comme démontré par les travaux de Decruyenaere *et al.* (2015).

Ce travail de fin d'étude a pour objectif d'évaluer la qualité de l'estimation de l'ingestion individuelle des taurillons Blanc Bleu Belges culards (BBBc) en croissance, nourris aux mashes, grâce à la FNIRS (fecal near infrared spectroscopy). Les aspects pratiques de la méthode, les précautions d'échantillonnage et les facteurs d'imprécision possibles sont également discutés dans ce travail.

I) Synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique présentée ci-après recense les mécanismes régissant l'ingestion chez le bovin ainsi que les méthodes d'estimation de celle-ci. La spectroscopie proche infrarouge y est également décrite afin de mieux comprendre les principes de la méthode d'estimation FNIRS.

1) Mécanismes de l'ingestion chez le bovin

La quantité journalière d'aliment ingérée par un bovin dépend à la fois de l'animal, caractérisé par sa CI (capacité d'ingestion), et de l'aliment ingéré, caractérisé par son ingestibilité (Figure 1).

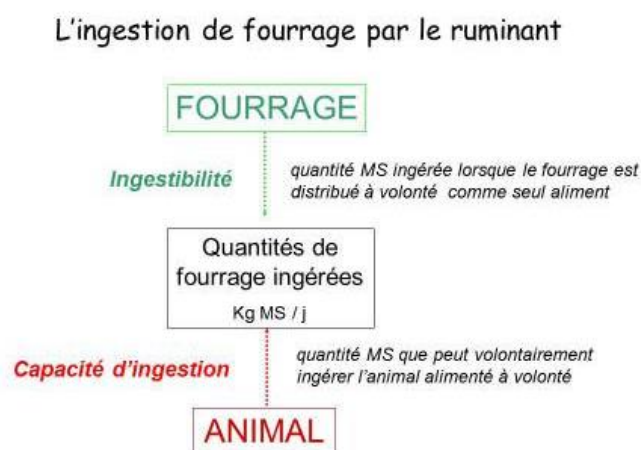


Figure 1: Ingestion de fourrage par le ruminant (supagro.fr, 5/04/2019)

Ces deux paramètres interagissent entre eux et ne peuvent pas être exprimés par une valeur unique en kg de MS (Matière Sèche) par jour. Pour étudier les sources de variation de ces paramètres, des expériences contrôlées sont réalisées. On peut ainsi comparer, d'une part, la capacité d'ingestion de différents animaux en leur distribuant à volonté les mêmes aliments et, d'autre part, l'ingestibilité de différents aliments en les distribuant à volonté aux même animaux (Jarrige *et al.*, 1995).

Les principaux facteurs déterminant la capacité d'ingestion d'un ruminant sont : la taille de son rumen, sa vitesse d'ingestion, ses besoins énergétiques et l'état de ses réserves énergétiques. Cette capacité d'ingestion théorique peut être diminuée si l'animal souffre de carences, de troubles sanitaires ou de stress (Jarrige *et al.*, 1995).

L'ingestibilité d'un fourrage est déterminée par son appétibilité, son encombrement, sa digestibilité et sa valeur énergétique. L'ingestibilité d'un aliment concentré est positivement corrélée avec sa teneur en protéines et donc en azote mais négativement corrélée avec sa teneur en amidon (Jarrige *et al.*, 1995).

1.1) Régulation de l'ingestion

La quantité d'aliment qu'un animal ingère est régie par les sensations de faim et de satiété. Lorsque l'animal est dans un état de faim, il se met à chercher, choisir et enfin ingérer des aliments. L'intensité de la faim dépend du degré de déficit énergétique mais peut aussi être stimulée par les caractéristiques des aliments eux-mêmes. Elle sera également différente selon l'individu et son état sanitaire (Jarrige *et al.*, 1995). Il existe deux types de satiété différents chez le ruminant : une satiété dite physique, contrôlée par la distension de la paroi du rumen et une satiété dite métabolique, contrôlée par une série d'hormones produites au niveau du système digestif (Allen, 2014).

Par conséquent, la satiété de type métabolique est prédominante lorsque, comme dans le cadre de ce travail, les animaux ingèrent majoritairement des aliments concentrés. La satiété physique est atteinte lorsque l'animal ingère des fourrages, plus encombrants et moins riches que le concentré.

Régulation physique

Le premier facteur inhibant la faim du ruminant est la distension de la paroi du rumen. Des récepteurs de tension sont localisés dans le réticulum et envoient des signaux au cerveau via les fibres afférentes vagues. Un sentiment de satiété est envoyé au cerveau lorsque la tension dans les parois du rumen augmente (Allen, 2014).

Cependant, l'ingestion du ruminant n'est pas régulée uniquement par la distension du rumen. Si tel était le cas, l'ingestion des ruminants se décomposerait en une succession de petits repas, dès que la distension de la paroi du rumen décroîtrait.

Il est connu que les ruminants ingèrent plusieurs repas par jour, séparés par une plus ou moins longue période de non-ingestion. En plus de la satiété physique, des facteurs chimiques interviennent dans la régulation de l'ingestion du ruminant (D'Mello, 2000).

Régulation métabolique

Weston (1996) indique que l'intensité de la faim est linéairement liée au déficit énergétique. Il s'avère aussi que le comportement alimentaire est déterminé par une interaction entre des signaux stimulateurs (orexigéniques) et inhibiteurs (anorexigéniques). Les premiers augmentent la sensation de faim tandis que les seconds la diminuent.

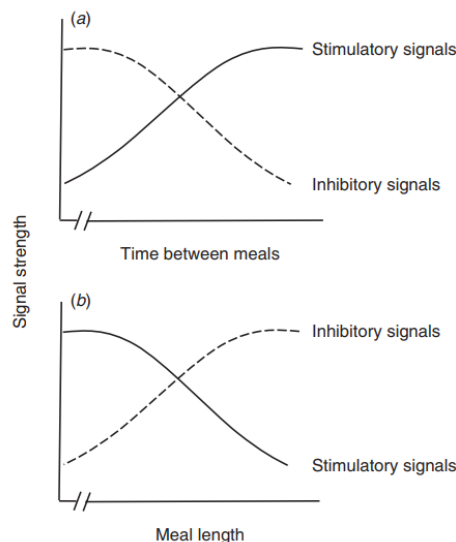


Figure 2: Intensité des signaux stimulateurs et inhibiteurs (a) entre les repas et (b) durant les repas (Allen, 2014)

Une molécule connue comme étant stimulatrice de la faim est la ghréline, un peptide produit par les cellules de l'abomasum chez le ruminant (Hayashida *et al.*, 2001). Cependant, son effet sur la prise alimentaire chez des ruminants nourris *ad libitum* reste incertain. La ghréline aurait une incidence sur le contrôle de l'ingestion à long terme car elle est sécrétagogue de la somatotropine. Cette dernière stimule la croissance, ce qui a pour effet de diminuer la quantité de nutriments présents dans le sang et, par conséquent, de provoquer une augmentation de l'ingestion (Bradford & Allen, 2008).

Comme chez les autres mammifères, des signaux inhibiteurs chimiques sont émis chez le ruminant. Des peptides intestinaux, des hormones pancréatiques et des adipokines sont produits et leurs concentrations influent sur l'ingestion d'aliment par l'animal (Allen, 2014).

La leptine, ou hormone de satiété, est une hormone produite principalement par les tissus adipeux. Elle sert d'indicateur à l'organisme en l'informant sur le niveau de ses réserves lipidiques. Cette molécule joue un rôle dans la régulation de l'appétit. Des mutations dans le gène codant pour la leptine ou pour ses précurseurs sont liées à des obésités massives chez le rongeur et chez l'homme (Chilliard *et al.*, 1999).

1.2) Facteurs influençant l'ingestion

Le contrôle à court terme de l'ingestion se fait à trois niveaux. Premièrement, la concentration de nutriments, d'hormones et de métabolites dans le sang va influencer le système nerveux de l'animal et guider son comportement alimentaire. Deuxièmement, la vitesse à laquelle les aliments traversent le tube digestif vont affecter la prise alimentaire. Enfin, les facteurs extérieurs (lumière, température, humidité, stress...) vont avoir un impact sur les quantités d'aliment ingérées (Decruyenaere *et al.*, 2009).

À long terme, l'ingestion est influencée par le poids et l'état physiologique de l'animal (Figure 3).

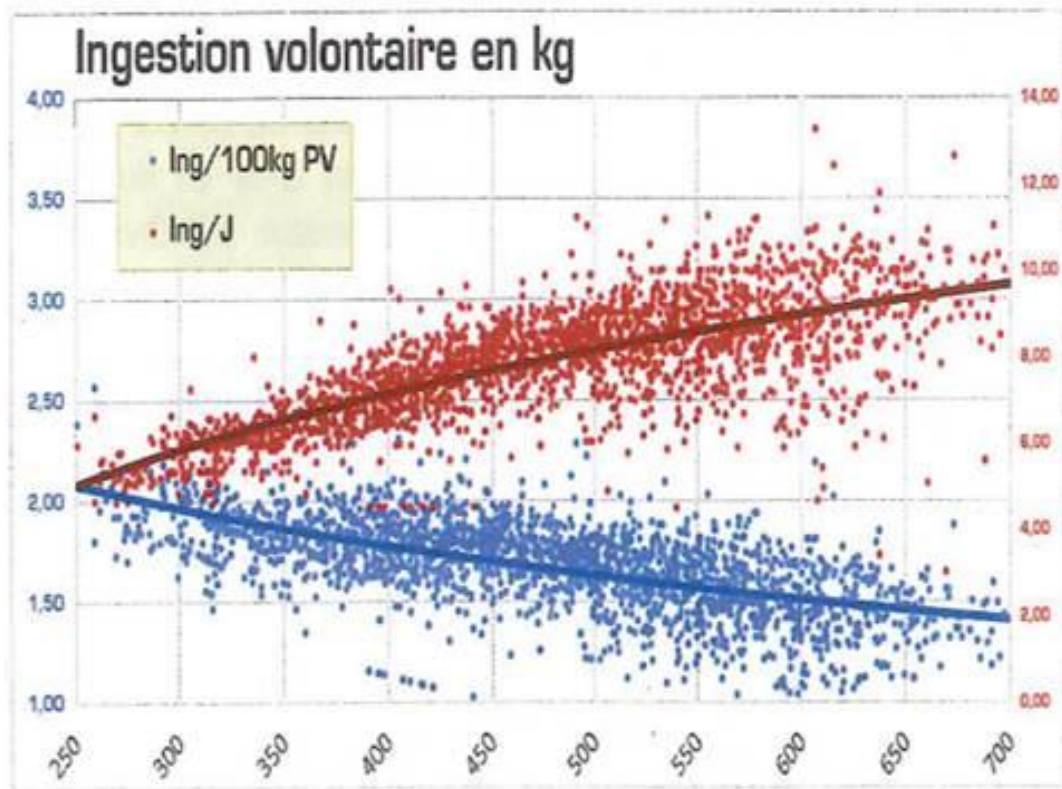


Figure 3: Evolution de l'ingestion de concentré en fonction du poids vif chez le BBBc (AWE, 2015)

La Figure 3 montre que l'ingestion totale (Ing / jour) est proportionnelle au poids et l'ingestion relative (Ing / 100 kg de PV) inversement proportionnelle au poids du taurillon BBBc.

Ainsi, lorsque des animaux sont comparés selon leur ingestion relative, leur poids doit être connu.

La taille du tractus gastro intestinal peut être reliée au poids vif selon une fonction du poids vif exposant 1 mais l'ingestion est reliée au poids selon une fonction du poids vif exposant 0,75. On parle alors de poids métabolique. L'état d'engraissement de l'animal est également un facteur faisant varier son ingestion. En effet, plus un animal est gras, plus son appétit est réduit. Ce phénomène, appelé régulation lipostatique, s'explique par le fait qu'un animal adulte tend naturellement à garder un poids stable (Zereu *et al.*, 2016).

1.3) Temps de transit des aliments

Le rythme de digestion des ruminants est influencé par le temps de transit des aliments dans le rumen. Les digesta peuvent être évacués du rumen sous formes de gaz (méthane), d'AGV (acides gras volatils) et autres petites molécules absorbables par la paroi du rumen ou de

particules assez fines et denses pour être évacuées par l'orifice réticulo-omasal (Chesworth *et al.*, 1996).

Chez les ruminants, les petites particules, dont la digestion est bien avancée, sortent du rumen tandis que les plus grosses y restent pour être ruminées (Baumont & Deswysen, 1991).

Des particules très digestibles disparaissent rapidement alors que d'autres, comme les parois, sont digérées plus lentement. Les parois indigestibles se retrouvent dans les matières fécales, et c'est en règle générale leur temps de séjour qui est déterminé (Dulphy *et al.*, 1995).

D'après Dulphy *et al.* (1995), le temps de séjour moyen des particules indigestibles chez le bovin est de l'ordre de soixante heures. Selon Sauviant *et al.* (2013) les composés solubles sont par contre immédiatement dégradés à 100% dans le rumen.

Le système des PDI permet d'évaluer la valeur azotée des aliments sur base des protéines alimentaires et microbiennes (Nozières *et al.*, 2007). Selon ce système, le taux de transit est de 6% / heure, quel que soit l'aliment considéré (Sauviant *et al.*, 2013).

Bien que les aliments concentrés soient constitués de fragments de petites tailles très digestibles, selon Jarrige *et al.* (1995), une baisse de la vitesse de transit serait observée lorsque la proportion d'aliments concentrés dans la ration s'accroît. Une baisse de l'activité de rumination et une moindre motricité des parois digestives expliqueraient cette baisse de vitesse.

1.4) Indice de consommation et residual feed intake

Comme le décrit Dourmad (2011), l'indice de consommation permet d'évaluer l'efficacité d'utilisation des aliments lors de la croissance des animaux selon la formule suivante :

$$IC = \frac{\text{consommation observée}}{\text{gain de poids}}$$

Trois paramètres sont pris en compte :

- les besoins de production
- les besoins d'entretien
- les autres besoins

Il existe un lien clair entre l'ingestion et l'indice de consommation. Si un animal mange à volonté, la part de nutriments nécessaire à l'entretien sera moins élevée que si l'animal est rationné. L'indice de consommation est maximal en cas d'alimentation *ad libitum* (Weston, 1996).

C'est la notion de Residual Feed Intake (RFI) qui explique les autres besoins. Le RFI explique la variabilité entre individus « toutes choses étant égales par ailleurs ». Cela permet également de comparer l'indice de consommation d'individus ayant des poids et des croissances différents (Vinet *et al.*, 2008). Le RFI peut être divisé en cinq processus, chacun générant de la variabilité dans l'efficacité alimentaire (Herd *et al.*, 2004) : l'ingestion, la digestion des aliments, le métabolisme (anabolisme et catabolisme), l'activité de l'animal et la thermorégulation. Une série d'expériences réalisées sur des ruminants ont été synthétisées par Herd *et al.* (2004) (Figure 4).

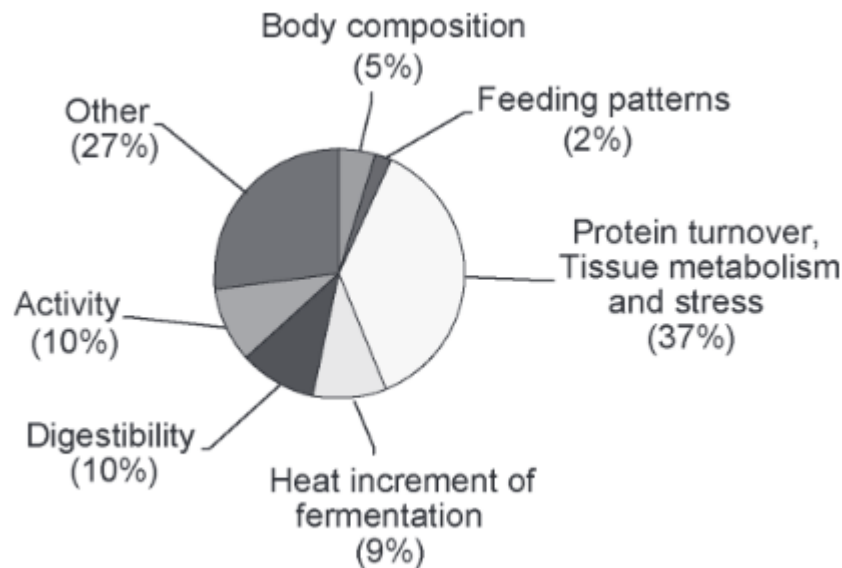


Figure 4: Contribution des différents mécanismes biologiques à la variation de la RFI (Herd *et al.*, 2004)

Selon leurs travaux, 73% de la variation de RFI est expliquée par la production de chaleur, l'activité physique et l'état de corpulence de l'animal. Les mécanismes responsables du quart restant sont encore inconnus.

Selon Tixier-Boichard *et al.* (2002), les sources principales de variation de production de chaleur sont à attribuer au régime alimentaire et à l'activité de l'animal.

1.5) Ingestion individuelle chez les ruminants logés et nourris en groupe

Dans l'immense majorité des élevages bovins, les animaux sont élevés en lots. Loger plusieurs animaux dans une même case facilite l'alimentation et le paillage et permet de réaliser des étables à moindre coût. Lorsque les animaux d'un même lot sont d'âge et de poids semblables, leur cohabitation est sereine. Contrairement au pâturage, le nourrissage à l'auge permet de connaître la quantité d'aliment que consomme le lot.

Néanmoins, lorsque les animaux sont logés en groupe, leur ingestion individuelle n'est pas connue. Seule une ingestion moyenne peut être obtenue en divisant la quantité totale ingérée par le nombre d'individus du lot. Cette méthode ne permet pas d'observer les variations individuelles d'ingestion au sein d'un même lot.

Il existe cependant des techniques permettant de connaître l'ingestion individuelle des animaux logés en groupe. Ces méthodes sont classées en deux groupes. Les méthodes dites directes consistent à connaître directement les quantités ingérées par des méthodes de pesée des aliments ou des matières fécales. Les méthodes indirectes, permettent d'estimer l'ingestion d'un animal lorsque les méthodes directes ne sont pas applicables.

Les méthodes présentées ci-dessous concernent aussi bien les animaux laitiers que viandeux. Bien qu'il existe des méthodes d'estimation de l'ingestion qui se basent sur l'étude d'échantillons de lait (de Souza *et al.*, 2019 ; Wallén *et al.*, 2018), elles ne seront pas présentées, car pas applicables à des races allaitantes, comme c'est le cas dans le cadre de ce travail.

Les méthodes directes

- La récolte de la totalité des matières fécales émises par un animal donne une bonne estimation de la quantité ingérée par ce dernier. Il suffit de connaître la digestibilité de l'aliment pour faire le lien entre la quantité excrétée et la quantité ingérée. Néanmoins, cette méthode est coûteuse, chronophage et génère un inconfort chez l'animal. Cet inconfort pourrait d'ailleurs causer un changement de comportement alimentaire chez celui-ci (Cabral I., 2017).
- L'utilisation de DAC (distributeurs automatiques de concentré). Les DAC permettent une complémentation en concentré personnalisée pour chaque animal, celui-ci possédant un collier électronique leur permettant de s'identifier à l'appareil lorsqu'il s'y présente, avant de recevoir une quantité connue d'aliment. Bien que les DAC soient surtout présents dans les élevages laitiers, des centres d'essais les utilisent pour nourrir des taurillons à l'engraissement afin de connaître leur ingestion individuelle. Le DAC peut éventuellement être équipé d'une balance, cela permet de connaître en continu le poids des animaux et d'exprimer leur ingestion par rapport à leur poids vif.

Les méthodes indirectes

- L'utilisation de marqueurs alimentaires se base sur l'ingestion pendant plusieurs jours par l'animal d'une quantité fixe d'un composé indigestible et facile à quantifier dans les excréments. La concentration en marqueur dans les échantillons de matière fécale est ensuite mesurée. Une quantité totale de fèces peut alors être calculée selon la formule (de Souza *et al.*, 2015) :

Excrétion totale de matière fécale (kg / jour)

$$= \frac{\text{quantité de marqueur dosée (g/jour)}}{\text{concentration du marqueur dans les fèces (g/kg)}}$$

Si le taux d'indigestibilité de l'aliment est connu, la quantité totale de matière sèche ingérée peut être déterminée :

Ingestion totale (kg/ jour)

$$= \frac{\text{excrétion totale de matière fécale (kg/jour)}}{\text{indigestibilité de l'aliment ingéré (\%)}}$$

Il existe des marqueurs externes, administrés en plus de l'aliment, comme l'oxyde de titane ou l'oxyde de chrome, et des marqueurs internes, comme les fibres non-digestibles contenues dans les aliments (Cabral *et al.*, 2017). L'utilisation de marqueurs externes a pour inconvénient de devoir administrer deux fois par jour une quantité précise de marqueur à l'animal. Il existe aussi des méthodes mixtes, se basant sur les deux types de marqueurs simultanément (Velásquez *et al.*, 2017).

- L'utilisation de systèmes de caméras à 3 dimensions, permet d'estimer la quantité de matière sèche ingérée à l'auge par la vache laitière grâce à l'étude d'imagerie 3D (Lassen *et al.* 2018), (Figure 5).

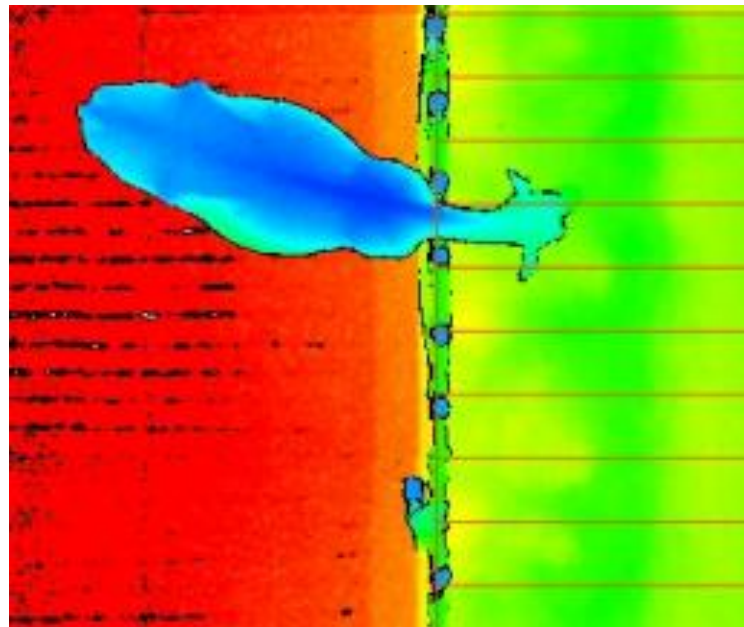


Figure 5: Imagerie 3 dimensions d'une vache laitière s'alimentant (Lassen *et al.* 2018)

Sur la Figure 5, la zone verte représente l'aliment proposé aux animaux. La hauteur de l'aliment peut être déterminée grâce à l'imagerie 3D. Le volume de celui-ci peut ensuite être calculé. Lorsque la densité de la ration est connue, la quantité de matière sèche ingérée par l'animal peut ainsi être obtenue en faisant la différence en les quantités avant et après le passage à l'auge.

La spectroscopie proche infrarouge appliquée aux matières fécales (FNIRS) permet également d'estimer l'ingestion des ruminants. Cette méthode est détaillée au chapitre suivant.

2) Spectroscopie proche infrarouge

2.1) Proche infrarouge

La spectroscopie infrarouge est une spectroscopie d'absorption dont le principe repose sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par la matière organique. La découverte du proche infrarouge et l'enregistrement des premiers spectres est à attribuer à Willam Herchel en 1801. Les régions du proche infrarouge se situent entre 14290 et 4000 cm^{-1} (Wathelet *et al.*, 2011).

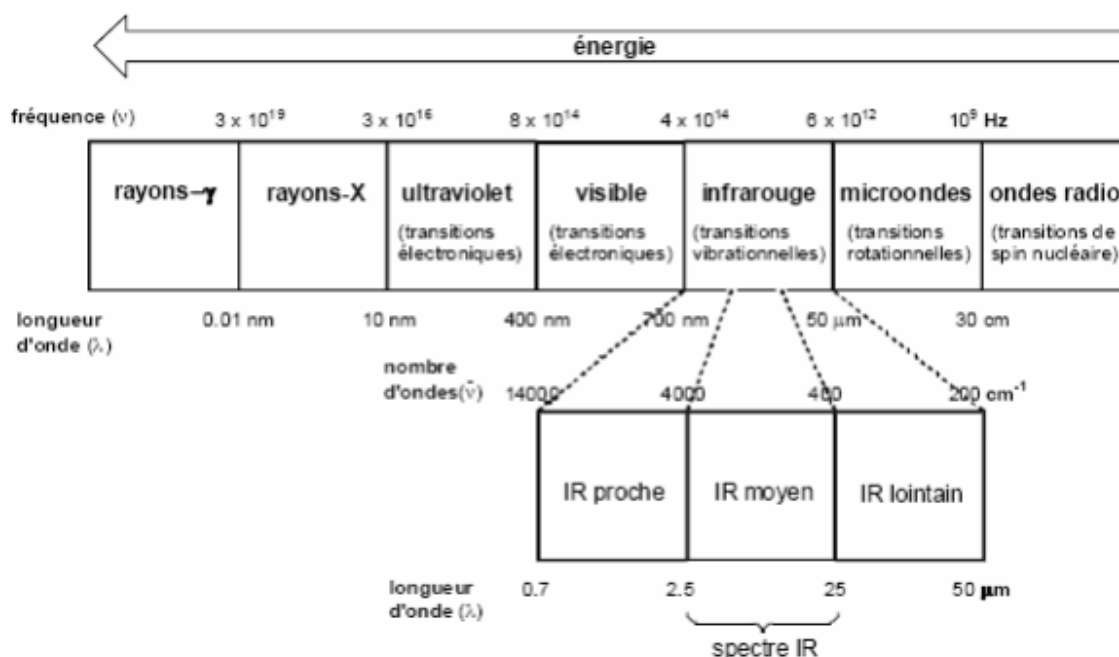


Figure 6: Le spectre électromagnétique et les différentes régions de l'infrarouge (Wathelet *et al.*, 2011)

L'origine des spectres proches infrarouges repose sur l'anharmonicité. La spectroscopie proche infrarouge est utilisée pour l'analyse de composés contenant des groupements C-H, N-H, O-H ou S-H, dont les vibrations sont fortement anharmoniques (Lachenal, 1998). Le proche infrarouge est très intéressant pour l'analyse de composés organiques car les quatre grandes macromolécules biologiques (lipides, acides nucléiques, protéines et hydrates de carbone) sont riches en liaisons hydrogènes (Rinnan, 2007).

Les premières applications analytiques de la spectroscopie proche infrarouge sont développées dans les années soixante par Karl Norris. A partir de 1975, la spectroscopie infrarouge prend une importance considérable grâce à la commercialisation d'appareils spécifiques permettant des analyses en série (Bertrand & Dufour, 2006). Les avantages de la spectroscopie proche infrarouge sont nombreux. Les échantillons peuvent souvent être analysés sans prétraitement spécifique, ceux-ci peuvent être de très petits volumes et l'analyse est non-destructive. Cela rend cette méthode rapide et peu coûteuse (Rinnan, 2007).

2.2) Calibration

Les méthodes couramment utilisées pour connaître la composition chimique d'un composé organique sont souvent chronophages, nécessitent l'emploi de produits parfois toxiques et peuvent s'avérer coûteuses.

A part un broyage et un séchage de l'échantillon dans certaines situations, les analyses infrarouges ne nécessitent pas de produits chimiques et l'échantillon n'est pas dégradé durant l'analyse, ce qui permet de réutiliser le même échantillon pour d'autres analyses (Minet *et al.*, 2017).

La méthode permettant de passer de spectres infrarouges à des données quantitatives est la création de modèles de calibration. Les informations relatives à l'échantillon analysé peuvent ainsi être prédites en s'appuyant sur des modèles statistiques.

Lorsqu'un modèle est calibré pour la prédiction d'un paramètre, de simples analyses infrarouges permettent de le prédire, et ce de manière rapide, peu coûteuse et non destructive (Samadi *et al.*, 2018).

Les méthodes d'étalonnage consistent à confronter, d'une part, un ensemble de spectres et, d'autre part, des valeurs connues de la variable à prédire (Cecillon, 2008). Une équation de calibration peut par exemple être établie à partir d'un ensemble d'échantillons dont le spectre infrarouge a été mesuré et dont la valeur en protéine a été analysée en laboratoire. Cette équation permet ensuite de déterminer la teneur en protéine d'échantillons similaires.

La calibration a pour but de sélectionner les longueurs d'ondes à introduire dans le modèle afin de minimiser les écarts entre les valeurs de références et les valeurs prédites par le modèle.

Il existe de nombreuses méthodes statistiques permettant d'établir une relation entre la variable à prédire (Y_m) et les variables explicatives (X_k), correspondant aux longueurs d'onde choisies.

La méthode de régression selon les moindres carrés partiels est une des méthodes les plus utilisées (Genot *et al.*, 2011). Elle peut être définie selon l'équation suivante :

$$Y = XB + E$$

Y et X se trouvent sous forme de matrice de n individus par m variables réponses et de n individus par k variables prédictives. B est une matrice de coefficients de régression (dimension k*m) et E correspond à l'erreur du modèle (Cécillon, 2008).

D'autres méthodes peuvent être utilisées pour établir des modèles prédictifs, notamment la régression au sens des carrés partiels (PLS). La PLS combine l'analyse en composante principale et la régression multilinéaire au sens des moindres carrés.

La validation croisée consiste à enlever successivement un ou plusieurs échantillons de la base de données pour obtenir un nouveau lot de données indépendant auquel le modèle peut être appliqué.

Les résultats d'un modèle prédictif sont présentés à la Figure 7. Chaque point correspond à un échantillon. Les prédictions d'ingestion se trouvent sur l'axe des abscisses et les valeurs de référence (quantité d'aliment réellement ingérée) sur l'axe des ordonnées.

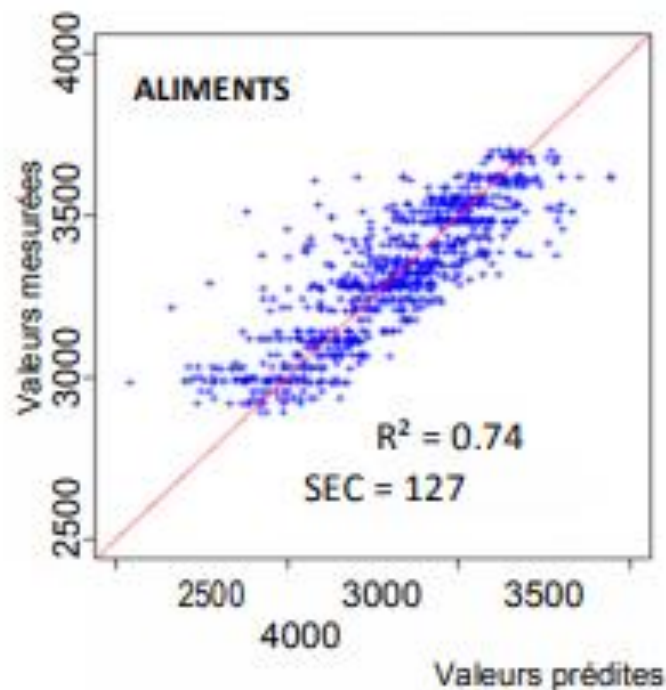


Figure 7: Prédictions FNIRS vs valeurs de référence pour la prédiction de la digestibilité de la protéine par des poulets (Vilariño *et al.*, 2016)

Si la précision était parfaite, tous les points devraient se trouver sur la bissectrice. Cependant, en raison d'une multitude de sources d'erreurs et d'imprécisions, les points se présentent sous la forme d'un nuage. Une fois l'équation de calibration déterminée, il convient de pouvoir juger de sa performance. Plusieurs paramètres statistiques le permettent (Minet *et al.*, 2017) :

- R square : coefficient de détermination, part de la variance expliquée par rapport à la variance totale. Plus le R^2 est proche de 1, plus le pouvoir prédictif du modèle est fort.
- Biais : erreur systématique moyenne entre les prédictions et les valeurs de référence.
- MSE : Mean Square Error, moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions du modèle et les valeurs de référence.
- RMSE : Root Mean Square Error, racine carrée de la MSE.
- SEC : erreur standard d'étalonnage, correspond à l'écart-type des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs de référence.
- SECV : erreur standard de cross-validation, correspond à l'écart-type des écarts entre les valeurs prédites grâce à une base de données ne contenant pas les échantillons à prédire et les valeurs de référence de ces échantillons.
- SEP : comme dans le cas de la prédiction illustrée à la Figure 7, si le set d'échantillons utilisé est indépendant du modèle prédictif, on ne parle plus de SEC mais bien de SEP : erreur standard de prédiction. Comme la SEC, la SEP représente la dispersion des points autour de la bissectrice.
- SD : standard deviation ou écart type, mesure la dispersion des valeurs d'un échantillon statistique.
- RPD : SD/SEC , plus le RPD est élevé et meilleure est la précision des prédictions. Si le RPD est compris entre 2,4 et 3, une discrimination grossière peut être effectuée entre les échantillons. S'il est supérieur à trois, le modèle permet de discriminer les échantillons en plusieurs groupes.

Un bon modèle prédictif possède donc un R^2 proche de 1, un SECV le plus petit possible, un RPD supérieur à trois et un biais nul (Minet *et al.*, 2017).

Un modèle prédictif qui compte dans sa base de données, des spectres représentatifs de l'ensemble de la population à analyser sera plus robuste et d'autant plus performant que les analyses de référence ont été réalisées avec précision (Minet *et al.*, 2017).

Comme expliqué ci-dessus, il existe un certain nombre de sources d'erreurs qui impactent la performance d'une prédiction. Deux d'entre elles sont particulièrement importantes.

- L'incertitude de mesure : il est impossible d'obtenir une précision de modèle supérieure à la précision de la mesure. La valeur obtenue lors de la mesure n'est jamais la valeur exacte mais est une valeur approchée.
- L'échantillonnage : les quantités analysées au spectroscope infrarouge sont infimes (environ 8g) en comparaison du lot à analyser. Il faut donc être très

attentif lors du remplissage des cellules, afin d'éviter, par exemple, une ségrégation de l'échantillon en fonction de sa granulométrie (Minet *et al.*, 2017).

2.3) Applications

Industrie céréalière

La SPIR (spectrométrie proche infrarouge) est largement utilisée dans les industries céréalières. Elle permet essentiellement de connaître la quantité et la qualité des protéines, la teneur en eau et les paramètres technologiques du grain (Bertrand & Dufour, 2006).

Agroalimentaire

Dans le secteur de la transformation agroalimentaire, l'automatisation est de plus en plus développée. Cette automatisation permet de réduire les coûts de production et de standardiser la qualité des produits finis. Néanmoins, les chaînes de production ne tolèrent pas beaucoup de variation de qualité des matières premières. Des analyses de routine permettent donc de tester régulièrement les matières premières entrant dans les processus de fabrication des aliments (Bertrand & Dufour, 2006)

Analyses de sol

La SPIR peut être appliquée à des analyses de terre. Certains laboratoires utilisent cette technique pour prédire les caractéristiques d'un échantillon de sol comme le carbone organique, la CEC (capacité d'échange cationique), l'azote total, le taux d'humidité et le taux d'argile (Genot *et al.*, 2014).

FNIRS

La spectroscopie infrarouge appliquée aux matières fécales, aussi appelée FNIRS, permet de mesurer la concentration de ses constituants comme les fibres, l'azote, les tannins, etc.

Des calibrations réalisées sur les spectres des matières fécales permettent aussi d'obtenir des informations sur le régime alimentaire des animaux excréteurs (Dixon & Coates, 2009). Des travaux sur la prédiction de la digestibilité des aliments (Dixon & Coates, 2011), sur la quantité de matière sèche ingérée par des moutons au pâturage (Decruyenaere *et al.*, 2003), et sur la quantité de matière sèche ingérée par des vaches laitières au pâturage (Lessire *et al.*, 2015) ont notamment été réalisés. Selon Decruyenaere (2015), la FNIRS appliquée à l'estimation de la digestibilité de la matière organique fournit une prédiction robuste et un bon coefficient de détermination ($R^2 > 0,90$).

Selon les travaux de Decruyenaere (2015), les prédictions d'ingestion développées avec des bases de données suffisamment grandes et variables sont assez robustes ($R^2 = 0,98$, RPD = 4,56) pour prédire l'ingestion de vaches au pâturage.

3) Objectifs du travail

Connaitre précisément la quantité ingérée par un bovin est un vrai challenge. Le niveau de précision d'une méthode de calcul est souvent inversement proportionnel à son coût et à la main d'œuvre qu'elle nécessite.

Parmi les nombreuses méthodes décrites, la FNIRS représente un bon compromis entre précision et difficultés d'application. Elle permet de prédire avec assez de précision l'ingestion des ruminants au pâturage.

Il n'existe cependant pas de travaux sur l'estimation de l'ingestion chez des taurillons culards nourris au mash grâce à la méthode FNIRS.

Le but de ce travail est donc de déterminer quelles sont les exigences et les performances d'une telle méthode appliquée dans un situation d'engraissement d'animaux culards à l'étable.

II) Matériels et méthodes

1) Généralités

Grâce à une collaboration entre la SCAM, le CRA-W (centre Wallon de recherche agronomique) et GxABT, les animaux de la SCAM ont été accueillis et logés sur le site de Gembloux, au CEPA (centre d'expérimentation en production animale), afin de disposer de toutes les infrastructures nécessaires (boîtes individuels, bascule à bovins, balances analytiques, étuves, etc.).

Le but de ce travail est d'établir une calibration entre l'ingestion des taurillons étudiés et les spectres infrarouges de leurs matières fécales. Les échantillons ont été récoltés au CEPA et ont été analysés au centre de recherche interdisciplinaire TERRA (Gembloux). Les spectres obtenus ont ensuite été transmis au CRA-W.

Comme pour toute calibration infrarouge, le nombre d'échantillons utilisés lors de la calibration influe sur la qualité de la prédiction. Il a donc fallu obtenir un maximum de couples de données (matière fécale / ingestion) afin de calibrer au mieux le modèle prédictif.

La robustesse de la prédiction est également influencée par la variabilité des valeurs de référence associées aux spectres. Différents régimes alimentaires ont été proposés aux animaux dans l'espoir d'augmenter cette variabilité.

L'expérimentation a été réalisée en 2019 sur 120 jours et se décompose en deux périodes d'adaptation et deux périodes expérimentales :

- **Période 1 (27/02-05/04)** : Adaptation des animaux depuis leur arrivée jusqu'à une alimentation en mash *ad libitum*.
- **Période 2 (05/04-08/05)** : Première période de nutrition *ad libitum*.
- **Période 3 (08/05-17/05)** : Transition lors de laquelle un changement de mash a été effectué.
- **Période 4 (17/05-26/06)** : Deuxième période de nutrition *ad libitum* avec un mash différent.

2) Matériel animal

L'expérimentation a été réalisée sur 16 taurillons BBBC, neuf d'entre eux provenaient d'un premier élevage, les sept autres provenaient d'un second élevage.

Les animaux ont été répartis en quatre lots de quatre animaux. Chaque lot a reçu deux types de mash différents durant l'essai.

Lors de l'allotement des taurillons, des groupes de poids et de provenance à peu près homogènes ont été constitués, les détails se trouvent au Tableau 1.

Tableau 1: Composition des 4 groupes expérimentaux

Animal	Lot	Provenance	Code	Poids lors de l'allotement (kg)	Date de naissance	Poids moyen du lot (kg)
1266	1	Origine 1	A1	369	12-05-18	373
3118	1	Origine 2	A2	409	30-05-18	
1273	1	Origine 1	A3	371	25-05-18	
1283	1	Origine 1	A4	344	12-06-19	
3718	2	Origine 2	B1	360	06-04-18	373
1272	2	Origine 1	B2	307	20-05-18	
1255	2	Origine 1	B3	437	26-03-18	
3720	2	Origine 2	B4	388	08-04-18	
1280	3	Origine 1	C1	367	03-06-18	375
3714	3	Origine 2	C2	380	28-03-18	
1270	3	Origine 1	C3	398	19-05-18	
3719	3	Origine 2	C4	353	07-04-18	
1260	4	Origine 1	D1	395	25-04-18	376
3717	4	Origine 2	D2	400	05-04-18	
3121	4	Origine 2	D3	346	13-06-18	
1281	4	Origine 1	D4	361	04-06-18	

Afin de tester de nouveaux ingrédients et nutriments à incorporer dans ses aliments, la SCAM dispose d'un centre d'engraissement de taurillons à Thorembais, le Beef-Center.

Le protocole sanitaire qui a été réalisé est le même que celui entrepris lors de l'entrée de nouveaux animaux au Beef-center, c'est-à-dire :

- Tuberculination
- Vaccination grippe: *bovis bovipast rsp*
- Vaccination IBR : *bovis ibr marker vivant*
- Traitement vermifuge et anti gale : *ecomectin pour-on*

3) Alimentation

3.1) Choix des aliments

Le principal objectif de la partie animale de l'expérience était d'obtenir une base de données d'ingestion large et variée.

Afin d'obtenir de la variabilité au niveau des quantités ingérées par les animaux, il a paru judicieux de les nourrir avec des aliments possédant eux-mêmes une certaine variabilité. Quatre types de mashes, de compositions chimiques assez différentes, ont donc été sélectionnés.

Les principales caractéristiques des mashes sont reprises dans le Tableau 2.

Tableau 2: Composition chimique et valeurs nutritives des mashes utilisés (au kg brut)

	Type amidon	Type fibre	Type matière grasse	Type pectine
Nutriment	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur
Humidité %	11,8	12,4	11,5	11,2
MAT%	14,3	14,7	15,2	16,7
MG brute %	3,6	3,9	5,7	2,6
ADF %	14,6	16,5	15,2	18,1
ADL %	2,9	4,8	3	2,6
NDF %	28,8	30,6	29,8	33,5
Sucre %	5,2	4,2	5,2	5,9
Amidon ew %	27,1	17,4	23,7	19,1
Sucre + Amidon %	32,3	21,6	28,9	25
Cendres brutes %	6,9	9,1	6,9	7,9
PB prot. %	4,6	4,4	4,9	6
PB dégr. %	10,4	8,8	10	13,6
OMS %	1,2	1,1	1,4	2,4
Amidon by-pass %	4,9	3,3	4,5	1,4
Lysine %	0,5	0,5	0,5	0,8
Méthionine %	0,2	0,2	0,2	0,3
DVE %	9,2	7,3	10,5	10,9
OEB %	0,1	2	-0,3	0,6
VEM	938,7	817,6	1006	934,3
VEVI	1006,6	859,9	1089,3	1000,3
MOF % de la MS	64	56,5	63	66,1

- MAT : matière azotée totale
- MG : matière grasse
- ADF : acid detergent fiber
- ADL : acid detergent lignin
- NDF : neutral detergent fiber
- Amidon ew : taux d'amidon selon la méthode Ewerts

- S+A : sucres + amidon
- PB prot. : protéines by-pass
- PB dégr. : protéines dégradables
- OMS : solubilité de la matière organique
- DVE : protéines digestibles dans l'intestin
- OEB : bilan des protéines dégradables
- VEM : énergie nette pour la production de lait
- VEVI : énergie nette pour la croissance intensive
- MOF : matière organique fermentescible

Chaque aliment choisi possède une caractéristique principale :

- Un type riche en amidon, formule « élevage » assez classique.
- Un type riche en fibre, comportant 4% de fibre de paille, 4% de fibre de luzerne (brins longs) et 4% de fibre de colza.
- Un type riche en matière grasse, destiné à des animaux en finition d'engraissement.
- Un type riche en pectine, comportant 50% de pulpe de betterave.

3.2) Distribution des aliments

La structure du dispositif expérimental a permis une séparation des sujets en 4 groupes distincts, chacun logés individuellement.

Les types de mash ont été distribués par groupe, selon la période. Chaque groupe a été séparé par au moins une allée, ce qui a rendu impossible l'ingestion d'un autre mash que celui de son groupe par un taurillon.

Le dispositif expérimental (Figure 8) ne possède pas de gradient d'hétérogénéité connu.

B1	B2	B3	B4		D1	D2	D3	D4
A1	A2	A3	A4		C1	C2	C3	C4

Figure 8: Dispositif expérimental

Un mash de type différent a été distribué à chaque groupe. Lors de l'essai, les types de mashes ont été permutés entre les groupes A et B et entre les groupes C et D lors de la phase de transition. Chaque taureau a donc reçu deux types de mashes à la fin de l'expérimentation.

Durant la période 1 (38 jours), dite d'adaptation, les taureaux ont été alimentés avec du préfané et de la paille durant une semaine. Le mash a ensuite été progressivement introduit dans leur ration durant les trois semaines suivantes, tout en diminuant la quantité de préfané distribuée. Durant les deux dernières semaines d'adaptation, le régime des animaux était exclusivement composé de mash et de paille à volonté.

Pendant cette période, un complément minéral a été ajouté à la ration des animaux à raison de 100g par jour et par animal. Ce complément comprend 20% de Calcium, 3% de Phosphore, 8% de Sodium et 3% de Magnésium.

Les périodes 2 (35 jours) et 4 (40 jours) étaient des périodes de nutrition *ad libitum* en mash, l'aliment était renouvelé tous les jours lors de la pesée des refus. Une attention particulière était portée aux râteliers à paille qui étaient remplis si besoin. La majorité des prélèvements de matières fécales ont été effectués lors de ces deux périodes.

La période 3 (8 jours) a permis de changer le type d'aliment des taureaux de manière progressive, en mélangeant les deux types d'aliments et en augmentant la proportion du nouveau mash tous les jours. Les proportions exactes d'ancien et de nouveau mash ne sont pas connues précisément durant cette période car, comme durant les périodes 2 et 4, les refus non souillés de la veille étaient récupérés puis intégrés dans la ration du jour.

4) Logement et contention

Les boxes individuels, dans lesquels les animaux sont logés, ont une largeur de 2 m et une longueur de 3 m. Le sol affiche une pente de 7% vers les rigoles à purin présentes à l'avant des boxes.

L'espace dont les animaux disposent leur permet de se lever, se coucher et se retourner. La séparation entre les 4 boxes de chaque allée est composée d'une barrière à barreaux, au travers de laquelle les animaux peuvent se voir et se sentir.

Le râtelier à paille est disposé sur cette barrière de séparation. Un abreuvoir est disposé entre deux loges voisines permettant un accès à l'eau à volonté.

Les mangeoires individuelles se trouvent à l'avant du box, leur inclinaison peut être réglée afin de permettre un nettoyage facile de celles-ci.

Tous les matins, un paillage abondant de chaque box est réalisé afin de maintenir les animaux sur une litière sèche. Les boxes ont été curés à deux reprises durant l'expérience.

5) Collecte des données et des échantillons durant les périodes 2 et 4

5.1) Ingestion journalière

La durée moyenne de la phase diurne lors des mesures de l'ingestion était de 14 heures et 7 minutes lors de la période 2 et de 16 heures lors de la période 4. Aucun éclairage artificiel n'était présent durant la phase nocturne.

Les mangeoires étaient individuellement vidées et pesées chaque matin. Afin d'éviter de gaspiller des aliments, les refus non souillés étaient rassemblés selon le type de mash, puis mélangés dans du mash frais avant la distribution.

Une quantité fixe d'aliment était distribuée dans les mangeoires après leur nettoyage. Afin d'éviter que la quantité distribuée soit insuffisante, elle était augmentée si les refus de la veille étaient inférieurs à 2 kg.

Les loges individuelles sont représentées à la Figure 9.



Figure 9: Loges individuelles des taurillons

Ingestion de mash

L'ingestion individuelle journalière de mash a été calculée en soustrayant le refus à la quantité offerte le matin précédent. La teneur en matière sèche de chaque mash a été mesurée en laboratoire et a permis de déterminer l'ingestion en matière sèche.

Ingestion de paille

La paille représente une source de fibre indispensable à la digestion des ruminants. La mastication prolongée de la paille fait saliver l'animal. La salive contient des bicarbonates et lorsque celle-ci atteint le rumen, l'acidité de son contenu est diminuée. Si l'animal ne rumine pas assez, il s'expose à une acidose qui peut s'avérer fatale.

Cette paille dont les animaux disposait n'a pas pu être pesée de façon régulière comme les mashes. La litière des animaux étant constituée de paille, il était impossible de connaître la quantité de paille de litière ingérée, ni la quantité de paille tombée du râtelier sur la litière.

Afin de pallier cette imprécision, une quantité de paille théorique a été calculée, selon deux méthodes.

- a) La première s'appuie sur une analyse infrarouge des matières fécales. Un modèle de calibration, déjà utilisé par le CRA-W dans d'autres expériences, permet d'estimer la

proportion de paille (% de la matière sèche ingérée) dans le régime alimentaire d'un bovin. Une proportion de paille ingérée a pu être calculée pour chacun des 4 types de mash. De cette proportion, une quantité journalière de paille ingérée a pu être calculée, et ajoutée à la quantité de mash calculée.

Le modèle de prédiction utilisé pour calculer cette ingestion théorique est cependant peu robuste et peu précis. La base de données utilisée ne comporte que 31 échantillons, le R^2 obtenu est de 0,65 et le SECV vaut 0,36%, soit 7,4% de la moyenne. Le ratio RPD de ce modèle n'est que de 1,7, soit bien inférieur à la valeur seuil de 3, en dessous de laquelle une discrimination correcte ne peut être réalisée.

Une ingestion théorique de paille a néanmoins été calculée selon cette méthode, faute de mieux.

- b) La seconde méthode, plus théorique, prend en considération la cause de l'acidification du rumen. Lorsque le taurillon ingère de la MOF (matière organique fermentescible), celle-ci fermente pour produire des AGV. Ces AGV, une fois dissous dans le rumen, en font diminuer le pH.

Cette méthode se base sur l'hypothèse que plus un animal ingérera de MOF, plus il produira d'AGV et plus son ingestion de paille sera importante afin de tamponner son rumen.

La quantité moyenne de paille ingérée a été arbitrairement fixée à 500 grammes de matière sèche par jour, pour une ingestion moyenne de MOF. La quantité moyenne de MOF a été calculée en moyennant l'ingestion de MOF de tous les animaux sur la durée de l'expérimentation. Une ingestion de paille journalière a donc été calculée pour chaque taureau en fonction de son ingestion de mash selon la formule :

$$\text{Ingestion de paille (g de MS / j)} = (500 / \text{ingestion moyenne de MOF par jour}) * \text{ingestion de MOF par jour}$$

Cette méthode permet, pour chaque mash, de prédire une ingestion de paille théorique. La quantité de paille ingérée en kg de MS par jour variera proportionnellement avec l'ingestion de mash. Ainsi, la proportion de paille dans la ration ingérée, estimée par cette méthode, ne varie que lorsque la composition du mash est modifiée.

5.2) Matières fécales

Durant la période 2, la méthode d'échantillonnage de matières fécales a d'abord consisté à prélever, à heure fixe, des échantillons sur la moitié des animaux de chaque lot (8 échantillons / semaine), puis sur l'ensemble des animaux en l'espace de trois jours (16 échantillons / semaine). Ce rythme de collecte a été augmenté durant la période 4, afin d'obtenir plus d'échantillons.

Durant la période 4, les prélèvements de matières fécales ont eu lieu sur tous les animaux, à heure fixe, du lundi au mercredi (48 échantillons/ semaine).

Cette routine d'échantillonnage a permis de récolter pour la période 2 (35 jours) 24 échantillons de matières fécales et 319 échantillons durant la période 4 (40 jours).

En plus d'un rythme de collecte plus élevé durant la période 4, la différence du nombre d'échantillons prélevés entre ces deux périodes s'explique par la collecte d'échantillons supplémentaires dans le but de répondre à des questions pratiques qui sont abordées ci-après (point 8.2).

Durant l'échantillonnage, les animaux étaient attachés à l'avant de leur box grâce à une longe. Le prélèvement se faisait soit par stimulation, soit par fouille anale, afin d'éviter une pollution des fèces par la paille de la litière.

Les échantillons de matières fécales étaient déposés dans une barquette en aluminium, identifiés et ensuite mis à l'étuve ventilée à 63 °C.

5.3) Pesée des animaux

Les taureaux étaient pesés un matin par semaine, avant la distribution de la ration. La pesée avait lieu de préférence le même jour de la semaine, à savoir le vendredi.

Une interpolation linéaire a été réalisée entre chaque pesée afin d'obtenir un poids vif estimé pour chaque jour, de cette façon, l'ingestion a pu être reliée au poids de l'animal sur toute la durée de l'essai.

La bascule utilisée était de la marque Satene (Figure 10), la précision de la pesée était de 1 kg.



Figure 10: Bascule à bovins

6) Traitement des échantillons

6.1) Matières fécales

Chaque jour, les 16 échantillons de matières fécales récoltés étaient directement placés dans une étuve ventilée à 63 °C durant 4 jours.

Les échantillons séchés ont été broyés à l'aide d'un « cyclotec sample mill » (Figure 11) de la marque Foss, équipé d'une grille à mailles circulaires de 1 mm de diamètre.

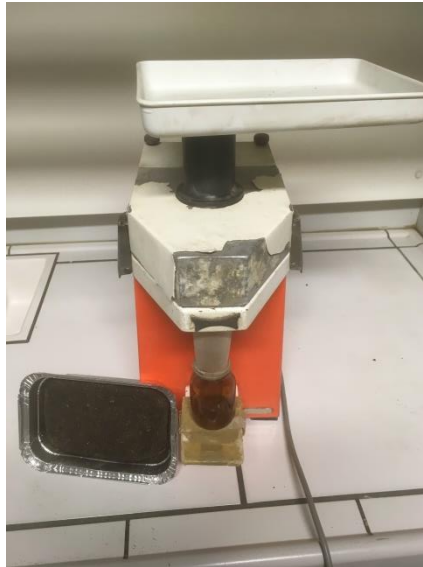


Figure 11: Cyclotec

Après leur broyage, les matières fécales étaient disposées dans des boîtes en plastique étanches en attendant que toutes les matières fécales hebdomadaires aient été broyées.

Une partie de chaque échantillon était disposée dans des cellules de mesure à fenêtre de quartz avant leur analyse infrarouge. Une attention particulière était portée lors de la mise en cellules, afin d'éviter une ségrégation granulométrique de l'échantillon. Le lot était soigneusement homogénéisé avant la mise en cellules et celle-ci était réalisée avec une cuillère adéquate. La mise en cellule (Figure 12) avait lieu le jour de l'analyse infrarouge, le délai entre ces deux opérations était en moyenne d'une à deux heures.



Figure 12: Mise en cellules des échantillons

6.2) Mash

Des échantillons de chaque mash ont été placés dans des barquettes en aluminium préalablement tarées et mis à l'étuve à 105 °C durant 72 heures afin de déterminer le taux exact de matière sèche.

7) Analyses spectrales

Une fois les échantillons de matières fécales séchés, broyés et mis en cellules, ils étaient envoyés au centre TERRA pour y être analysés au spectroscope infrarouge. L'appareil utilisé est un spectroscope XDS de la marque FOSS.

Les spectres ainsi obtenus ont été traités au CRA-W. La base de données spectrale reliant les spectres aux quantités ingérées de référence a été introduite dans le logiciel WINISI (FOSS) afin de réaliser des calibrations de l'ingestion.

Dans un premier temps, une prédiction de la composition chimique des matières fécales a été réalisée. La deuxième approche consistait à réaliser les calibrations permettant d'établir des modèles capables d'estimer l'ingestion à partir des valeurs prédites par la spectroscopie.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les chapitres suivants.

8) Traitement des données

8.1) Conditions d'échantillonnage

Influence de l'exposition des échantillons à l'air libre sur le spectre

Lors de cette expérience, les échantillons de matières fécales étaient mis à sécher directement après leur collecte. Si une collecte de matières fécales est entreprise en ferme, il se pose la question du transport des échantillons jusqu'au lieu de séchage. Entre le moment de la collecte et de la mise à l'étuve, l'échantillon resterait à l'air libre. S'il y a une certaine distance à parcourir jusqu'à un laboratoire, ou si plusieurs fermes font l'objet d'échantillonnage avant que les prélèvements ne soient étuvés, cette période d'exposition serait plus ou moins longue.

Cela pourrait être problématique si l'exposition à l'air libre de matières fécales fraîches modifiait leur spectre infrarouge.

Lors de l'expérimentation, 24 échantillons de fèces ont été divisés en trois parties. Chaque partie du même échantillon a été placée à l'étuve à 3 heures d'intervalle. Les échantillons non étuvés étaient conservés dans l'étable.

Le but de cette opération était de déterminer si le spectre infrarouge d'un échantillon resté à l'air libre avant son séchage était différent de celui ayant été étuvé juste après sa collecte.

Pour ce faire, une analyse de la variance à un facteur fixe (heure de mise à l'étuve) a été réalisée sur les prédictions de compositions chimiques des matières fécales.

Influence de l'heure de la collecte sur le spectre

Les taurillons de cet essai étaient nourris à volonté. Ils avaient donc de la nourriture à disposition en permanence. Néanmoins, il est connu que les animaux organisent leurs repas de façon cyclique. Il se pourrait donc que la composition de leurs déjections varie également de façon cyclique au cours de la journée.

Si tel était le cas, un certain biais pourrait être introduit si les prélèvements de matières fécales avaient lieu à des heures différentes.

Durant trois jours consécutifs, une série d'échantillonnages de matières fécales a été réalisée à deux reprises sur tous les animaux durant la même journée (9 heures et 16 heures). Le but était de comparer les 48 couples de spectres ainsi obtenus et de déterminer s'ils étaient significativement différents.

Comme pour le point précédent, une analyse de la variance à un facteur fixe (heure de la collecte) a été réalisée.

8.2) Constitution des paires « spectre infrarouge – valeur de référence »

Virginie Decruyenaere, attachée scientifique au CRA-W et personne de référence concernant la spectroscopie infrarouge pour ce travail, a utilisé un modèle MPLS (modified partial least square) en validation croisée.

Les ingestions de référence associées aux spectres ont été exprimées de plusieurs façons : en valeur absolue (kg de MS par jour), relative (kg de MS/ 100 kg de PV ou g de MS / kg de PM), mesurées sur un ou plusieurs jours...

L'ingestion théorique de paille a également été prise en compte.

De même, afin de lisser les variations journalières d'ingestion, les spectres infrarouges et leurs valeurs de référence propres ont été moyennés, par animaux, de plusieurs manières.

L'ensemble des scénarios utilisés ont été établis en concertation avec Virginie Decruyenaere.

Aliments pris en compte

Comme cela a été expliqué au point 5.1, deux calculs d'estimation de quantité de paille ingérée ont été réalisés. L'ingestion des animaux qui a été associée à chaque spectre individuel journalier était soit :

- L'ingestion de mash seule
- L'ingestion de mash + paille estimée grâce à l'infrarouge
- L'ingestion de mash + paille estimée grâce à la MOF

Expression de l'ingestion

L'ingestion des aliments a été calculée en soustrayant les refus à la quantité distribuée à chaque animal. Elle peut donc être exprimée en quantité de matière sèche ingérée par jour.

Il a été jugé intéressant d'également exprimer l'ingestion sous forme d'énergie car les aliments ingérés par les taureaux avaient des densités énergétiques différentes, aussi bien les types de mash que la paille.

L'expression de l'ingestion sous forme d'énergie nette permet également de minimiser l'impact de la paille sur l'ingestion. La densité énergétique de la paille étant bien inférieure à celle des mashes.

La valeur énergétique de la paille provient de la table alimentaire RADAR (2006).

Ainsi, l'ingestion journalière peut être exprimée de deux manières différentes :

- Ingestion sous forme de matière sèche
- Ingestion sous forme de VEVI

Pondération de l'ingestion par le poids

Les ingestions de référence associées à chaque spectre ont été exprimées en valeurs absolues ou en rapport avec le poids de l'animal :

- Ingestion par kg de poids vif (kg de MS / 100 kg de PV ou VEVI / 100 kg de PV)
- Ingestion par kg de poids métabolique (g de MS / kg de PM ou VEVI / kg de PM)
- Ingestion en valeur absolue (kg de MS / jour ou VEVI / jour)

Temporalité de l'ingestion

Pour chacune de ces trois expressions de l'ingestion, le temps écoulé entre la prise de nourriture et la production de la bouse est inconnu dans cette expérimentation. Pour la constitution des paires « spectre – valeur de référence », il a été décidé de considérer :

- Ingestion de la veille du prélèvement de fèces
- Ingestion de l'avant-veille du prélèvement de fèces
- Ingestion trois jours avant prélèvement de fèces
- Ingestion quatre jours avant prélèvement de fèces
- Ingestion moyenne des deux jours avant prélèvement de fèces
- Ingestion moyenne des trois jours avant prélèvement de fèces
- Ingestion moyenne des quatre jours avant prélèvement de fèces

Ainsi, de nombreuses combinaisons peuvent être calculées ($3 \times 2 \times 3 \times 7$).

Après calcul, 126 valeurs d'ingestion peuvent être associées à chaque spectre infrarouge individuel.

Spectres de la base de données

La routine d'échantillonnage a permis, la plupart du temps, de récolter les matières fécales d'un même taureau durant trois jours consécutifs.

Les spectres infrarouges associés aux valeurs de référence ont pu être utilisés tels quels. Afin de lisser les variations journalières d'ingestion par taureau, ils ont aussi été moyennés sur deux ou trois jours consécutifs, lorsque cela était possible.

Ainsi, lorsque la base spectrale a été moyennée, les ingestions de référence de chaque spectre individuel ont également été moyennées, pour toutes les expressions et tous les pas de temps utilisés.

Lorsque les spectres infrarouges de la base spectrale sont moyennés, les échantillons prélevés dans le but d'une prédiction ne doivent pas l'être. Une base « spectre moyenne 3 jours » n'implique pas d'échantillonner des fèces trois jours consécutifs sur le même animal.

Trois bases de données spectrales distinctes ont donc été créées : spectre individuel seul, moyenné sur deux jours ou moyenné sur trois jours consécutifs. Les 126 valeurs d'ingestion sont donc représentées trois fois dans l'ensemble des modèles, ce qui monte le nombre de modèles totaux établis à 378 (126×3).

L'étude statistique des résultats obtenus consiste à déterminer quels modèles parmi les 378 établis présentent les meilleures performances.

8.3) Traitement des données statistiques

Comme cela a pu être évoqué, plusieurs analyses de variances ont été réalisées. Elles l'ont été sur le logiciel Minitab et sur la suite Excel.

L'effet de l'exposition des matières fécales à l'air libre sur le spectre infrarouge a été testé grâce à une analyse de la variance à un facteur fixe (heure de mise à l'étuve. L'effet de l'heure de prélèvement sur la prédiction de la composition des fèces a également été testé avec une AV1, le facteur fixe étant l'heure de prélèvement.

L'impact des facteurs « mash » et « période » sur l'ingestion des taurillons a été mesuré grâce à des analyses de variances à deux facteurs.

Les moyennes de proportions théoriques de paille ingérée ont été testées avec des AV1 fixes, le facteur étant le type de mash.

Enfin, la précision de la prédiction selon le type de mash a été analysée avec une AV1 fixe, le facteur étant le type de mash.

III) Résultats et discussion

La détermination de l'ingestion individuelle de bovins logés en groupe est traitée dans ce travail chez le taurillon BBBc en croissance, alimenté à volonté à base de mash et de paille de céréale. La méthode d'estimation de ce paramètre est la spectroscopie proche infrarouge.

La calibration d'un modèle infrarouge présente plusieurs exigences.

- Une base de données comportant un nombre important d'échantillons : un modèle prédictif ne sera de bonne qualité qu'avec un nombre suffisant d'échantillons et de valeurs de référence. La collecte de ceux-ci est détaillée au point 2 de cette partie.
- Une variabilité des valeurs de référence de la base de données : plusieurs facteurs ont été introduits durant cette expérimentation afin d'obtenir une grande variabilité de l'ingestion. Cet aspect a été détaillé dans le point 3 de ce travail.
- La précision de mesure des valeurs de référence : l'ingestion de paille est inconnue, et sa prise en compte induit une imprécision sur la valeur de référence de l'ingestion. De plus, le poids des taurillons n'étant pas connu de façon exacte pour tous les jours d'expérimentation, une imprécision est également présente sur le poids journalier de ceux-ci, et donc, sur le calcul de l'ingestion relative. Ces aspects sont détaillés au point 3 de cette partie.
- L'attribution de la valeur de référence adéquate à un spectre : la temporalité entre l'ingestion de mash et l'émission des matières fécales est inconnue. Plusieurs de ces temporalités ont donc été testées. Ce sujet est abordé au point 4.
- La gestion des échantillonnages pendant et après le prélèvement : le protocole de prélèvement ainsi que la gestion des matières fécales fraîches peuvent avoir des répercussions sur le spectre infrarouge. Le point 4 traite également de cet aspect.

Toutes ces exigences ont succinctement été décrites au point 1 avant d'être développées en détail par la suite.

Les modèles de calibration développés sont présentés à la fin de ce travail, les statistiques obtenues ont été discutées en fonction de chaque modèle. Les statistiques de tous les modèles obtenus se trouvent en annexe.

1) Résumé des exigences

1.1) Mesure de l'ingestion et nombre d'échantillons

Plus un modèle compte dans sa base de données, des spectres représentatifs de l'ensemble de la population à analyser, plus il sera robuste (Minet *et al*, 2017). Plus le nombre de spectres sera important et plus leurs valeurs de référence seront variables, meilleurs seront les performances de calibration.

Deux sources de variabilité de l'ingestion, en plus de la variabilité individuelle entre taurillons, étaient présentes dans cette expérimentation : l'alimentation ainsi que le poids et l'âge des taurillons.

La variabilité induite par l'alimentation peut être mesurée en testant le facteur « mash ». La variabilité induite par le poids et l'âge peut être mesurée en testant le facteur « période ».

1.2) Valeur de référence de l'ingestion journalière d'aliment

Evolution de l'ingestion journalière absolue et relative

Les animaux présents dans cet essai étaient en phase de croissance. L'ingestion journalière augmente avec le poids de l'animal, de manière à répondre aux besoins énergétiques croissants (régulation métabolique de l'ingestion) et à l'augmentation de la capacité physique de son tube digestif (régulation physique de l'ingestion) (voir synthèse bibliographique points 1.1 et 1.2).

L'ingestion journalière des taurillons (kg de MS / jour) augmente de manière à répondre à ces besoins. Cette augmentation n'est néanmoins pas linéaire (voir synthèse bibliographique point 1.2), et l'ingestion relative des animaux (kg de MS / 100 kg de PV) diminue avec l'augmentation du poids des animaux.

Il est donc important de connaître l'ingestion des animaux durant l'entièreté de la période d'expérimentation, afin de couvrir la plus grande partie de leur période de croissance et obtenir une plus grande variabilité dans les valeurs d'ingestion.

Ingestion de paille

La quantité de paille ingérée est inconnue dans cette expérimentation. Deux méthodes ont été utilisées afin d'estimer la quantité de paille que les taurillons ont ingérés. Cette quantité de paille estimée permet d'apporter une correction sur l'ingestion réelle d'un taurillon (mash + paille).

Cela permet également d'estimer la trace de la paille dans la matière fécale, en multipliant les proportions de mash et de paille ingérés par leur digestibilité.

Fluctuation journalière de l'ingestion

D'un jour à l'autre, l'ingestion des taurillons fluctue autour de la tendance globale. Ces fluctuations peuvent être réduites en moyennant l'ingestion sur plusieurs jours afin d'obtenir une valeur de référence plus proche de l'ingestion moyenne.

Le but d'une méthode de prédiction de l'ingestion est d'obtenir une information plutôt générale sur l'ingestion d'un animal. Si une valeur d'ingestion moyennée sur plusieurs jours permet d'obtenir de bonnes statistiques de calibration, elle sera privilégiée car l'ingestion prédite sera alors plus proche de l'ingestion moyenne de l'animal.

1.3) Spectre fécal

Temporalité entre le spectre fécal et l'ingestion de référence

La durée de transit des aliments dans le tube digestif des ruminants a été abordée dans la synthèse bibliographique (point 1.3). Cette durée de transit n'a pas été mesurée durant cette expérimentation, il n'a pas été possible de connaître exactement le nombre d'heures séparant l'ingestion et l'émission de la fraction non digérée de l'aliment sous forme de matières fécales. Autrement dit, de connaître la date de référence de l'ingestion témoignée par un spectre infrarouge.

Le calcul de l'ingestion des animaux a été réalisé toutes les 24 heures. Ce délai représente le pas de temps le plus court pouvant être utilisé. Selon la littérature, le temps de transit d'un aliment peut prendre jusqu'à 60 heures pour un composé indigestible, les composés très digestibles pouvant quant à eux être digérés quasi instantanément (synthèse bibliographique, point 1.3).

Les pas de temps entre l'ingestion de référence à joindre au spectre infrarouge et l'échantillonnage de matières fécales ont été de 24, 48, 72 et 96 heures avant le prélèvement de matières fécales. Des valeurs supérieures à 60 heures ont volontairement été choisies afin de garder une marge de sécurité, la durée réelle de transit étant pour rappel inconnue.

Caractéristiques du spectre fécal

Idéalement, une méthode d'estimation de l'ingestion doit pouvoir se réaliser en ferme de manière peu contraignante. Si les précautions et mesures à prendre sont trop importantes, cette méthode s'avèrerait peu adaptée à des analyses de terrain.

Le prélèvement et la gestion des échantillons de matières fécales sont deux procédés pouvant avoir des répercussions sur les résultats d'une prédiction infrarouge.

Le facteur « heure de prélèvement des matières fécales » a été testé, en effet, il se pourrait que des matières fécales soient échantillonnées à des heures différentes dans le même élevage pour des raisons diverses. Dans de telles conditions, la comparaison d'ingestion entre les différents taureaux testés ne peut se faire que si l'heure de prélèvement n'influence pas le spectre infrarouge des matières fécales.

L'humidité des matières fécales étant assez importante, une série de microorganismes présents dans les fèces et l'environnement de l'étable peuvent se développer et modifier la composition chimique des fèces prélevées. Une fois le prélèvement effectué, le laps de temps écoulé jusqu'à la mise à l'étuve pourrait avoir une influence sur le spectre infrarouge. Le facteur « heure de mise à l'étuve » a donc été testé.

1.4) Calibration

Les performances de calibration ont été évaluées selon plusieurs facteurs : le coefficient de détermination (R^2 ou RSQ) qui doit être le plus proche de l'unité et l'erreur standard de cross validation (SECV) qui doit être la plus faible possible.

Pour pouvoir être comparés entre eux, les SECV de modèles utilisant différentes unités d'ingestion sont divisés par la moyenne d'ingestion leur correspondant. Le SECV est alors exprimé en pourcentage, on parle de coefficient de variation (CV).

La robustesse des calibrations a été évaluée grâce au ratio RPD. Ce ratio est obtenu en divisant la déviation standard (SD) par l'erreur standard de cross validation (voir point 2.2 de la synthèse bibliographique). Un ratio inférieur à 2,4 ne permet pas de discrimination, même grossière, entre les échantillons. Si le ratio est supérieur à 3, une discrimination de qualité convenable peut être effectuée (voir matériels et méthodes, point 8.3).

Ces trois critères principaux : R^2 , SECV et RPD vont permettre de déterminer quels sont les meilleurs modèles parmi les 378 calculés (voir matériels et méthodes, point 8.3).

L'analyse des résultats est une succession de comparaisons entre les résultats obtenus pour chaque modalité d'un facteur. Ce procédé itératif de comparaison des indicateurs de qualité, amènera aux modèles les plus précis.

2) Calcul de l'ingestion et nombre d'échantillons de fèces

L'intensité d'échantillonnage de fèces et la régularité de calcul de l'ingestion sont décrites ci-dessous afin de rendre compte au lecteur du nombre de spectres et de valeurs de référence obtenus.

L'ingestion des animaux a été calculée tous les jours de cette expérimentation durant lesquels une ration *ad libitum* en mash et paille était distribuée. Cela représente 83 données d'ingestion par taureaux, soit 1328 ingestions journalières individuelles.

Le prélèvement de matières fécales a permis de récolter plus de 300 échantillons, le détail de la collecte se trouve au Tableau 3.

Tableau 3 : Nombre d'échantillons de matières fécales récoltés

	Mash 1	Mash 2	Mash 3	Mash 4	
	Nombre de matières fécales échantillonnées				
9 au 11 avril	2	2	2	2	Période 2
7 au 9 mai	4	4	4	4	
14 au 16 mai	12	12	12	12	Période 3
20 au 22 mai	12	12	12	12	Période 4
3 au 5 juin	12	12	12	12	
10 au 12 juin	12	12	12	12	
17 au 19 juin	24	24	24	24	
24 au 26 juin	12	12	12	12	

Au total, 360 échantillons de matières fécales ont été récoltés sur la durée de l'expérimentation.

Entre le 17 et le 19 juin, les prélèvements ont eu lieu deux fois par jour, afin de tester les conditions d'échantillonnage (voir matériels et méthodes, point 8.2). Seuls les échantillons récoltés le matin ont été utilisés dans la calibration infrarouge, ceux prélevés l'après-midi ont uniquement servi à tester l'effet « heure de prélèvement » sur le spectre.

Pour la calibration des modèles infrarouges, 312 spectres ont donc été utilisés.

Comme le montre le Tableau 3, le nombre d'échantillons de matières fécales récoltés durant la période 2 (24) est largement inférieur à celui de la période 4 (288). L'intensité de prélèvement a pu être augmentée lorsque qu'une certaine confiance a été établie avec les animaux, permettant un travail sans danger.

Du fait de ce manque de données en période 2, des analyses statistiques tentant de montrer un effet « période », qui se baserait sur l'analyse de matières fécales, n'ont donc pas été effectuées. Cet effet a par contre été testé sur les données d'ingestion, car la mesure de ce facteur a été continue durant toute l'expérimentation.

Des échantillons de matières fécales ont également été prélevés durant la période 3 (transition alimentaire). La quantité d'aliments ingérés durant cette période est connue, une ingestion de référence a donc pu être mise en relation avec le spectre infrarouge.

Par contre, la densité énergétique du mélange des deux mashes est inconnue durant cette période, les proportions de chaque mash variant pour chaque taureau (voir matériel et méthode, point 5.1). Des valeurs d'ingestion exprimées sous la forme d'énergie ne sont pas disponibles lors de cette période. La base de données des modèles de calibration où l'ingestion est exprimée sous forme d'énergie compte donc 48 spectres de moins.

3) Variabilité de l'ingestion et poids des animaux

L'ingestion des taurillons peut être exprimée en valeur absolue (kg de MS / jour) ou sous forme relative, en divisant l'ingestion absolue par le poids (vif ou métabolique) de l'animal.

Comme cela a été évoqué dans la synthèse bibliographique (point 1.2), l'ingestion absolue augmente avec le poids de l'animal. La Figure 13 confirme cette tendance à la hausse de l'ingestion absolue pour les taurillons de cette expérimentation.

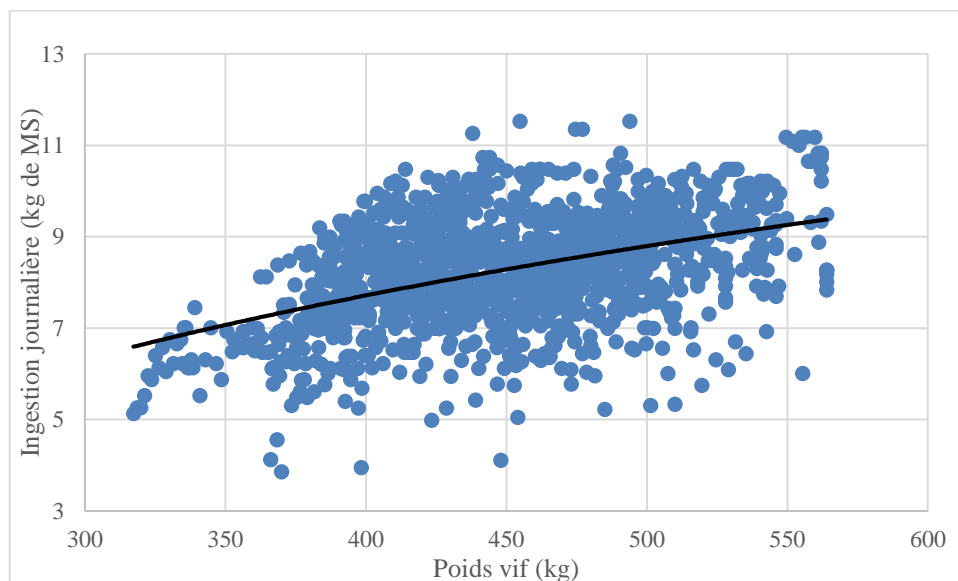


Figure 13 : Evolution de l'ingestion absolue en fonction du poids vif

A l'inverse, l'ingestion relative des animaux (kg de MS / 100 kg de PV) décroît avec l'augmentation du poids vif (Figure 14).

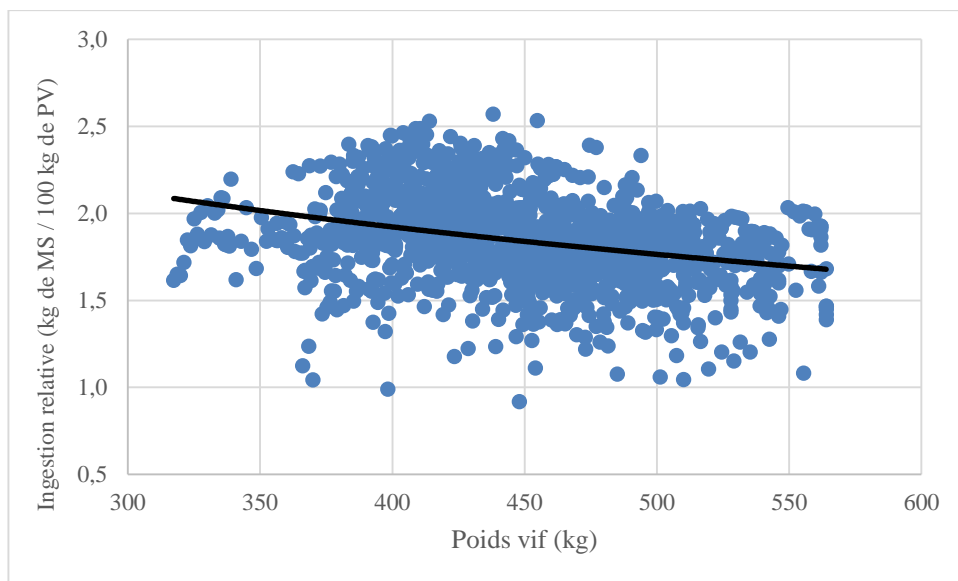


Figure 14 : Evolution de l'ingestion relative en fonction du poids vif

Ces deux expressions de l'ingestion ont été utilisées comme valeurs de référence des calibrations infrarouges. Les différences de robustesse et de précision des modèles seront discutées au point 5 de cette partie.

La qualité d'une calibration infrarouge est liée à la variabilité des valeurs de référence. La variabilité de l'ingestion des animaux est décrite ci-dessous, pour les ingestions absolues et relatives.

Les différentes sources de variabilité y ont été testées afin de rendre compte de leur effet réel sur l'ingestion des animaux.

L'évolution du poids des animaux et la méthode de calcul du poids journalier ayant permis le passage de l'ingestion absolue à l'ingestion relative sont également décrites.

3.1) Ingestion de mash

Ingestion absolue

Afin d'induire une certaine variabilité de l'ingestion des animaux, plusieurs types de mashes leur ont été distribués durant cette expérimentation. Les ingestions journalières selon le type de mash sont reprises dans les Tableaux 4 et 5, d'abord sous forme de kg de matière sèche puis sous forme de VEVI.

Tableau 4 : Ingestion absolue en fonction du type de mash et de la période

		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane	Ecart-type	Coefficient de variation
		kg de MS/jour					%
Période 2	Mash fibre	9,30	6,11	11,35	9,43	0,94	10,10
	Mash pectine	7,38	3,86	10,25	7,27	1,30	17,60
	Mash amidon	7,89	5,31	10,44	8,07	0,92	11,71
	Mash lipide	7,48	4,98	10,14	7,61	0,88	11,80
Période 4	Mash fibre	9,08	5,96	11,61	8,76	0,99	10,86
	Mash pectine	8,75	5,76	11,17	9,17	1,11	12,74
	Mash amidon	8,06	4,11	10,32	8,13	1,04	12,93
	Mash lipide	8,00	5,05	10,09	8,18	0,99	12,42

Tableau 5 : Energie nette ingérée en fonction du type de mash et de la période

		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane	Ecart-type	Coefficient de variation
		VEVI / jour					%
Période 2	Mash fibre	9165	6019	11178	9286	926	10,10
	Mash pectine	8421	4401	11704	8303	1482	17,60
	Mash amidon	9130	6140	12079	9336	1069	11,71
	Mash lipide	9322	6209	12636	9477	1100	11,80
Période 4	Mash fibre	8949	5869	11436	8631	972	10,86
	Mash pectine	9986	6577	12756	10464	1272	12,74
	Mash amidon	9323	4754	11935	9407	1206	12,93
	Mash lipide	9962	6288	12575	10190	1237	12,42

Les moyennes d'ingestion des Tableaux 4 et 5 ont été obtenues en moyennant les ingestions journalières individuelles pour chaque groupe de taurillons concerné par le mash et la période en question.

Le mash fibreux, moins riche en énergie nette, est celui ingéré en plus grande quantité de MS durant les deux périodes d'essai (Tableaux 4).

Ce constat est en accord avec le point 1.1 de la synthèse bibliographique. Lorsque la satiété physique n'est pas atteinte, la satiété métabolique régule en priorité l'ingestion du ruminant. Etant donné que la satiété physique n'est pas atteinte lorsque la ration est à base d'aliment concentré, une augmentation de l'ingestion peut être observée afin de compenser partiellement la moindre teneur en énergie nette de la ration.

Les ingestions moyennes, de matière sèche et d'énergie nette, ne sont pas identiques pour tous les mashes et pour les deux périodes, ce qui laisse à penser que ces facteurs induisent bien une variabilité de l'ingestion des taurillons.

Une analyse de la variance à deux facteurs (« mash » et « période ») a été réalisée afin de tester si les différences d'ingestions d'aliment et d'énergie nette sont significatives (Tableau 6).

Tableau 6 : P-values des ingestions absolues de mash et d'énergie

Ingestion	p-value Mash	p-value Période
Kg de MS / jour	<0,0001	<0,0001
VEVI / jour	<0,0001	<0,0001

Les facteurs « Mash » et « Période » ont tous deux des impacts très hautement significatifs sur l'ingestion de matière sèche et d'énergie des animaux. La variabilité d'ingestion souhaitée durant cette expérimentation a bien été augmentée grâce à l'emploi d'aliments différents et de deux périodes durant la croissance des animaux.

Ingestion relative

Afin d'obtenir des données d'ingestion relative, l'ingestion journalière a été divisée par le poids quotidien des animaux. Une série de pesées, espacées d'environ une semaine, a été réalisée afin de connaître de façon précise le poids vif des animaux au long de l'expérimentation. Le poids métabolique s'obtient en élevant le poids vif à la puissance 0,75.

Le poids des animaux a été mesuré à dix reprises, le détail des pesées, moyenné par lot, se trouve au Tableau 7.

Tableau 7 : Synthèse des pesées des taurillons par lot

	A	B	C	D
	Poids vif moyen du lot (n = 4) (kg de PV)			
28-mars	373	373	375	376
18-avr	411	397	413	414
26-avr	421	406	420	422
03-mai	462	441	455	460
09-mai	445	423	439	440
17-mai	462	441	455	460
06-juin	491	467	483	496
14-juin	504	478	494	511
21-juin	511	488	508	524
26-juin	519	490	513	528

Les poids des animaux entre chaque pesée ont été déterminés par un modèle linéaire. Un GQM individuel était calculé entre chaque pesée.

Ainsi, le poids de chaque taureau a pu être calculé pour tous les jours de l'expérimentation. L'évolution quotidienne du poids vif moyen de chaque lot de 4 taurillons est présentée à la Figure 15.

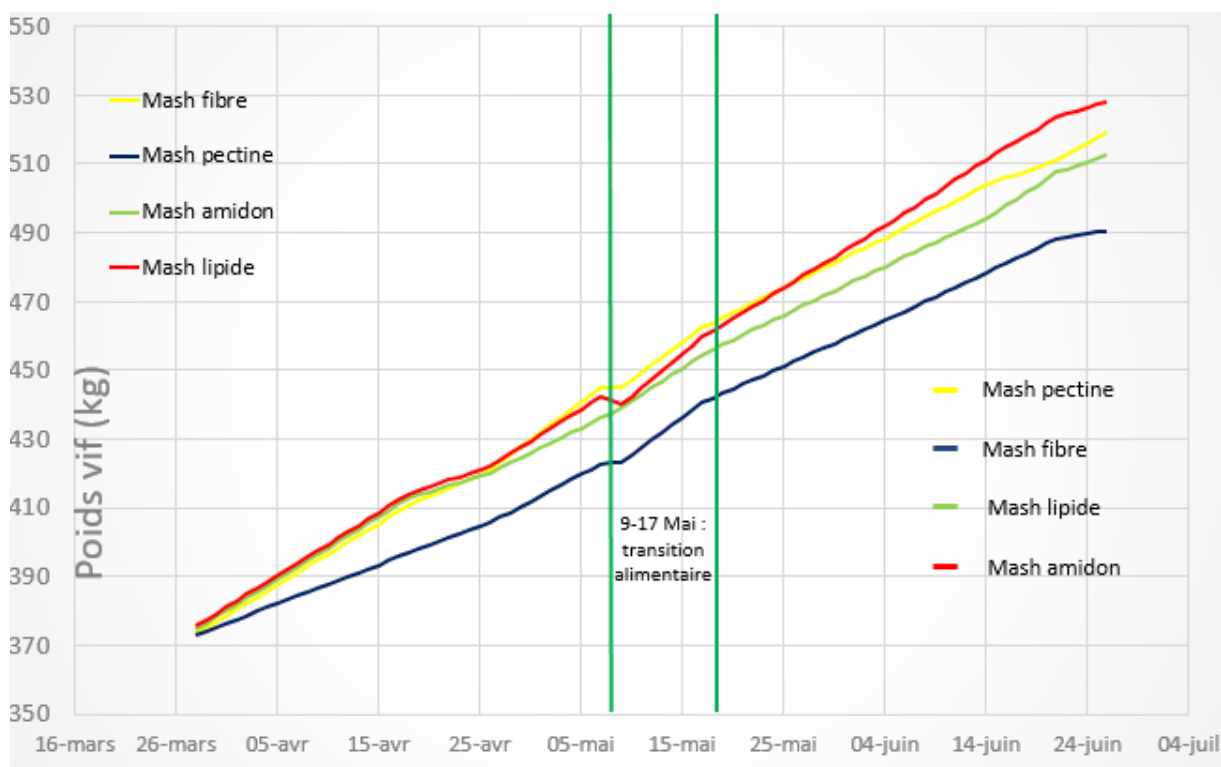


Figure 15 : Evolution du poids vif moyen des taurillons en fonction du mash ingéré

Chaque courbe représente un lot de 4 taurillons dont le type de mash a progressivement été modifié entre le 9 et le 17 mai.

Un fois le poids de chaque taurillon calculé pour tous les jours de l'expérimentation, leur ingestion journalière a pu être exprimée sous forme relative (kg de MS / kg de PV ou PM). Les ingestions relatives, selon le poids vif et le poids métabolique, sont reprises par période et par mash aux Tableaux 8 et 9.

TABLEAU 8 : Ingestion relative (PV) en fonction de la période et du type de mash

		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane	Ecart-type	Coefficient de variation
		kg de MS / 100 kg de PV					%
Période 2	Mash fibre	2,24	1,66	2,53	2,27	0,16	7,10
	Mash pectine	1,83	0,99	2,28	1,86	0,21	11,43
	Mash amidon	1,90	1,36	2,33	1,90	0,20	10,65
	Mash lipide	1,79	1,18	2,32	1,80	0,17	9,60
Période 4	Mash fibre	1,90	1,48	2,33	1,94	0,17	8,94
	Mash pectine	1,77	1,20	2,33	1,79	0,19	10,70
	Mash amidon	1,63	1,06	2,01	1,65	0,21	12,68
	Mash lipide	1,65	0,92	2,05	1,68	0,18	11,08

Tableau 9 : Ingestion relative (PM) en fonction de la période et du type de mash

		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane	Ecart-type	Coefficient de variation
		g de MS / kg de PM					%
Période 2	Mash fibre	101,10	72,94	114,13	102,70	7,58	7,49
	Mash pectine	82,05	44,23	103,07	82,85	9,88	12,04
	Mash amidon	85,80	61,16	106,87	86,20	9,12	10,63
	Mash lipide	81,05	53,39	105,93	81,63	7,95	9,81
Période 4	Mash fibre	88,11	66,25	106,21	90,91	7,63	8,66
	Mash pectine	83,41	57,56	109,98	84,50	8,78	10,52
	Mash amidon	76,83	50,10	94,55	77,79	9,45	12,29
	Mash lipide	77,50	42,20	95,78	78,38	8,71	11,23

Comme pour l'ingestion absolue, une analyse de variance à deux facteurs (« mash » et « période ») a été réalisée pour l'ingestion relative (Tableau 10).

Tableau 10 : p-values des ingestions relatives

Ingestion	p-value Mash	p-value Période
kg de MS / 100 kg de PV	< 0,0001	< 0,0001
g de MS / kg PM	< 0,0001	< 0,0001

Les deux facteurs testés ont un impact très hautement significatif sur l'ingestion relative des animaux, en fonction du poids vif comme en fonction du poids métabolique.

Les facteurs de variabilité ont donc eu une incidence concrète sur l'ingestion des animaux. Cette variabilité des valeurs de référence influencera positivement les statistiques de calibration des modèles infrarouges.

Ces différentes façons d'exprimer l'ingestion ont permis de créer plusieurs bases de données de références distinctes. Chaque base de données contient toutes les ingestions de référence à associer aux spectres exprimées dans des unités différentes.

La variabilité de l'ingestion, pour chaque base de données, est synthétisée dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Variabilité de l'ingestion en fonction de son expression

	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation
kg de MS / jour	8,27	1,22	14,8%
VEVI / jour	9308	1260	13,5%
kg de MS / 100 kg de PV	1,85	0,26	14,2%
g de MS/ kg de PM	85,05	11,61	13,4%
VEVI / 100 kg de PV	207	24,80	12%
VEVI / kg PM	95,20	10,91	11,5%

Comme le montre le Tableau 11, la variabilité de l'ingestion n'est pas fortement impactée par son expression.

Néanmoins, il peut être intéressant de comparer les performances des modèles de calibration se référant à ces différentes expressions de l'ingestion car la variabilité de la base de données n'est pas le seul facteur à prendre en compte pour apprécier la qualité d'une calibration infrarouge.

3.2) Ingestion de paille

Comme cela a été expliqué au point 5.1 de la partie matériels et méthodes, deux méthodes d'estimation de l'ingestion de paille ont été utilisées. L'ingestion réelle de paille étant impossible à calculer dans les conditions d'expérimentation, ce sont ces ingestions théoriques qui ont été ajoutées aux ingestions de mash dans certains des modèles de calibration (voir point 5).

Estimation de l'ingestion via la spectroscopie infrarouge

La méthode d'estimation de l'ingestion de paille via la spectroscopie infrarouge a permis de prédire des ingestions de paille pour chaque échantillon de matières fécales analysé.

Le Tableau 12 reprend les proportions de paille dans la ration, par type de mash.

Tableau 12 : Prédictions infrarouges du pourcentage de paille dans la ration en fonction du mash

	Moyenne	Min	Max	Médiane	Ecart type	Coefficient de variation
Mash	% de l'ingestion totale (MS)					%
Lipide	4,83	2,29	7,45	5,12	1,13	23,5
Amidon	5,43	4,01	7,56	5,39	0,71	13,0
Fibre	5,93	4,57	7,22	5,98	0,45	7,6
Pectine	7,18	5,93	8,74	7,14	0,64	9,0

Il est intéressant de remarquer que le mash fibreux, contenant déjà 4% de paille de froment dans sa composition, n'est pas l'aliment avec lequel la proportion de paille dans la ration ingérée est la plus importante.

Les valeurs d'ingestion de paille varient selon le mash distribué. Une analyse de variance à un critère de classification a été réalisée afin de comparer les moyennes selon ce paramètre (Tableau 13).

Tableau 13 : Comparaison des moyennes de proportion de paille dans la ration, prédites via l'infrarouge

Moyenne lipide	Moyenne amidon	Moyenne fibre	Moyenne pectine	p-value mash
4,83 %	5,43 %	5,93 %	7,18 %	< 0,0001

Le type de mash distribué aux animaux a un impact très hautement significatif sur leur consommation de paille estimée grâce à la spectroscopie infrarouge.

Le mash contenant plus de pectine est celui avec lequel la proportion de paille prédite est la plus élevée.

Avec un taux de MOF de 66,1% de la MS, ce type de mash est le plus fermentescible dans le rumen (voir Tableau 2). Comme cela a été expliqué au point 5.1 de la partie matériels et méthodes, la paille ingérée a un effet fonctionnel. Sa rumination permettant à l'animal de saliver et d'ainsi tamponner son rumen. Il serait donc logique qu'un aliment plus fermentescible, acidifiant plus fortement le rumen, incite l'animal à ingérer plus de paille. C'est d'ailleurs la base du raisonnement tenu au point suivant.

Estimation de l'ingestion de paille par rapport à l'ingestion de MOF

La deuxième méthode d'estimation de l'ingestion de paille est basée sur l'ingestion de MOF des animaux. La quantité ingérée de mash et sa composition étant connues pour les périodes 2 et 4, l'ingestion théorique de paille a pu être calculée individuellement, pour tous les jours de ces deux périodes.

Les proportions de paille dans l'ingestion totale sont les mêmes quelle que soit la quantité ingérée car l'ingestion est proportionnelle à la teneur en MOF du mash.

Elles sont donc présentées en moyenne selon le type de mash dans le Tableau 14. Le résultat de l'AV1 Figure également dans ce Tableau.

Tableau 14 : Comparaison des moyennes de proportion de paille dans la ration, prédites via la MOF

Moyenne lipide	Moyenne amidon	Moyenne fibre	Moyenne pectine	p-value mash
5,77 %	5,80 %	5,20 %	6,36 %	< 0,0001

Le type de mash distribué a un impact très hautement significatif sur la consommation de paille estimée par rapport à la MOF.

Mash contenant de la paille

La mash fibreux contenant 4% de paille de froment, cette paille ingérée via le mash est comprise dans le calcul de l'ingestion journalière de mash.

Afin d'éviter un double comptage de celle-ci lorsque la quantité de paille sera calculée à partir de sa proportion dans la ration, une correction doit être effectuée. Ainsi, pour l'aliment fibreux, la proportion de paille ingérée, en plus du mash est de :

$[0,593 - (0,04 * (1-0,0593))] = 2,17 \%$ pour la méthode FNIRS.

$[0,520 - (0,04 * (1-0,0520))] = 1,41 \%$ pour la méthode MOF.

Quantité de paille ingérée

La quantité de paille ingérée peut être calculée en confrontant la quantité de mash ingérée et la proportion de paille dans la ration des animaux (toutes deux connues) :

- ***Paille ingérée (kg de MS) = % paille * ingestion totale (kg de MS)***
- ***Ingestion totale (kg de MS) = mash ingéré (kg de MS) + paille ingérée (kg de MS)***

➔ ***paille ingérée = % paille * (mash ingéré + paille ingérée)***

➔ ***paille ingérée = (% paille * mash ingéré) + (% paille * paille ingérée)***

➔ ***paille ingérée - (% paille * paille ingérée) = (% paille * mash ingéré)***

➔ ***(1 - % paille) * paille ingérée = (% paille * mash ingéré)***

➔ ***paille ingérée = (% paille * mash ingéré (kg de MS)) / (1 - % paille)***

Le pourcentage de paille dans la ration étant connu pour chaque mash et la quantité de mash ingérée ayant été mesurée en permanence, la quantité de paille ingérée peut être calculée.

Le Tableau 15 reprend ces quantités ingérées, par période et par mash.

Tableau 15 : Quantité de paille ingérée en fonction de la période et du type de mash

		NIRS		MOF	
		Ingestion totale de paille	Ingestion de paille hors mash	Ingestion totale de paille	Ingestion de paille hors mash
		g de MS / jour		g de MS / jour	
Période 2	Mash fibre	586	206	510	133
	Mash pectine	570		501	
	Mash amidon	453		486	
	Mash lipide	380		458	
Période 4	Mash fibre	573	202	498	130
	Mash pectine	676		594	
	Mash amidon	462		496	
	Mash lipide	406		490	

Influence de la paille sur le spectre infrarouge

La matière organique non digérée de la ration des animaux se retrouve dans leurs matières fécales. Les proportions de matière organique dans les matières fécales issues de la paille et du mash sont différentes des proportions de matière organique ingérées, car les taux de matière organique digestible de ces deux aliments ne sont pas identiques.

Le taux de matière organique digestible (MOD) des 4 mashes a été estimé à partir de la composition chimique et de la digestibilité de la matière organique (méthode cellulase) issue de l'analyse en spectroscopie proche infrarouge des aliments. Celui de la paille de froment provient de la table CVB (2012). Le Tableau 16 reprend ces taux.

Tableau 16 : Teneur en MOD des mashes et de la paille de froment

Aliment	Mash fibre	Mash amidon	Mash lipide	Mash pectine	Paille de froment
	MOD (g / kg de MS)				
	679	758	753	757	385

La MOD de la paille de froment est bien plus faible que celle des mashes utilisés. La proportion de matière organique issue de la paille qui se retrouve dans les matières fécales sera plus élevée que la proportion de matière organique issue de la paille dans la ration.

L'évolution de « l'importance » de la paille avant et après digestion est reprise au Tableau 17. Les quantités de paille estimées sont celles mesurées par spectroscopie infrarouge.

Tableau 17 : Evolution de l'importance de la paille avant et après digestion

	% MO de la paille dans la ration	% MO de la paille dans les matières fécales
Mash fibre	5,9	12,2
Mash pectine	7,2	21,3
Mash amidon	5,4	14,8
Mash lipide	4,8	13,8

Les proportions de matières organiques issues de la paille sont nettement supérieures dans les matières fécales que dans la ration ingérée par les taurillons.

Ainsi, la paille n'étant que peu ingérée par rapport au mash, son importance est plus grande dans les matières fécales.

Ce détail a son importance car durant ce travail, la prédiction de l'ingestion des animaux se base sur l'analyse de matières fécales et la quantité de paille ingérée n'a pas pu être mesurée.

Les quantités ci-dessus, sont estimées par des moyennes par type de mash. La variabilité réelle de l'ingestion de la paille reste totalement inconnue.

A titre d'exemple, l'ingestion de paille a théoriquement été augmentée et diminuée de 50% pour un animal nourri avec le mash lipidique durant la période 4. Les proportions de MO issues de la paille dans la ration et les matières fécales se trouvent dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Evolution de proportion de MO issue de la paille dans la ration et dans les fèces en fonction de l'ingestion de paille

	Ingestion de paille (kg de MS)	Ingestion de mash (kg de MS)	% MO de la paille dans la ration	% MO de la paille dans les matières fécales
Ingestion paille -50%	0,203	8	2,4%	7,4%
Ingestion paille	0,406	8	4,8%	13,8%
Ingestion paille +50%	0,609	8	7,0%	19,3%

Ainsi, une augmentation ou une diminution de l'ingestion de paille d'environ 200 grammes de MS, influence l'ingestion totale de MO du taurillon de l'ordre de $\pm 2\%$, mais influence la proportion de MO issue de la paille dans les fèces de l'ordre de $\pm 6\%$. La MO issue de la paille dans les fèces est environ trois fois plus importante que la MO issue de la paille dans la ration. Cette « trace » de la paille dans les matières fécales pourrait donc varier de façon assez importante selon la quantité de paille ingérée, même si la quantité de paille ingérée est faible par rapport à l'ingestion totale journalière.

Il se pourrait également que la temporalité entre l'ingestion et l'émission sous forme de fèces soit différente pour la paille et le mash (voir synthèse bibliographique point 1.3). La « trace » d'un mash dans les matières fécales pourrait apparaître très rapidement, à l'inverse de celle de la paille, ingérée sous forme grossière et nécessitant une longue mastication et une durée de fermentation dans le rumen plus grande. « L'effet retard » de la paille serait donc plus important.

Ainsi, même si la quantité de paille ingérée pouvait être calculée, sa prise en compte dans la valeur d'ingestion associée à un spectre pourrait être décalée dans le temps par rapport au mash.

Enfin, chez le taurillon BBBC à l'engraissement, la paille a bien plus un rôle fonctionnel que nutritionnel. L'ingestion de paille par ces animaux est souhaitée pour son action mécanique, mais pas pour son apport nutritionnel, assez faible. La mesure systématique de l'ingestion de paille et de MO s'y rapportant n'est pas envisageable dans la pratique.

3.3) Fluctuation journalière de l'ingestion

L'ingestion d'un taurillon peut varier d'un jour à l'autre. Le calcul de l'ingestion d'un animal sur 24 heures ne donne qu'une indication peu précise sur son ingestion moyenne.

Si la valeur de référence de l'ingestion est moyennée sur plusieurs jours, le risque de prédire une ingestion assez différente de la moyenne est plus faible.

L'ingestion journalière d'un taureau de cette expérimentation durant la période 4 est présentée à la Figure 16. La courbe bleue représente l'ingestion journalière de l'animal, la courbe rouge la moyenne mobile de l'ingestion sur 4 jours.

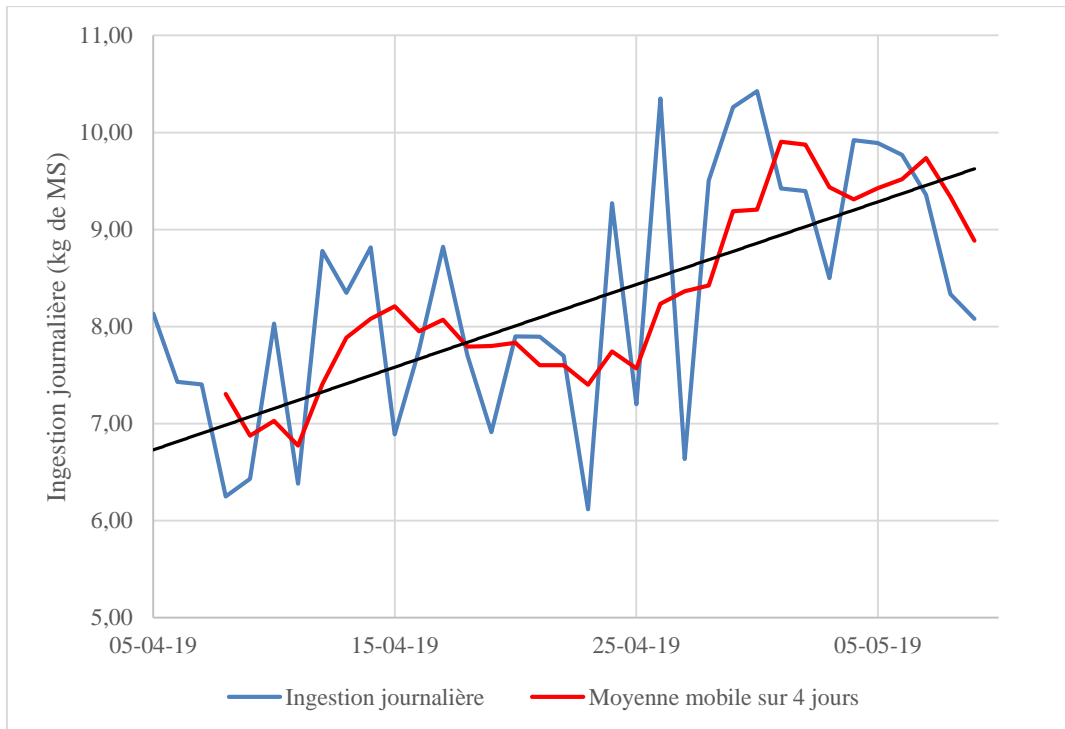


Figure 16 : Variation journalière de l'ingestion d'un taurillon

Dans cet exemple, la dispersion de l'ingestion journalière, mesurée par la somme des carrés des écarts, est réduite de plus de moitié lorsque l'ingestion est moyennée sur 96 heures plutôt que 24, passant de 53,8 à 26,8 kg².

Le risque de sur ou sous-évaluer l'ingestion d'un taurillon est donc réduit lorsque son ingestion est exprimée en moyenne sur plusieurs jours.

Dans ce travail, les ingestions de référence ont été utilisées seules ou moyennées de deux à quatre jours, selon les différents modèles utilisés. Si les statistiques de calibration ne sont pas détériorées en travaillant avec des ingestions moyennes, ces modèles seront privilégiés car plus représentatifs de l'ingestion moyenne de l'animal.

4) Spectres fécaux

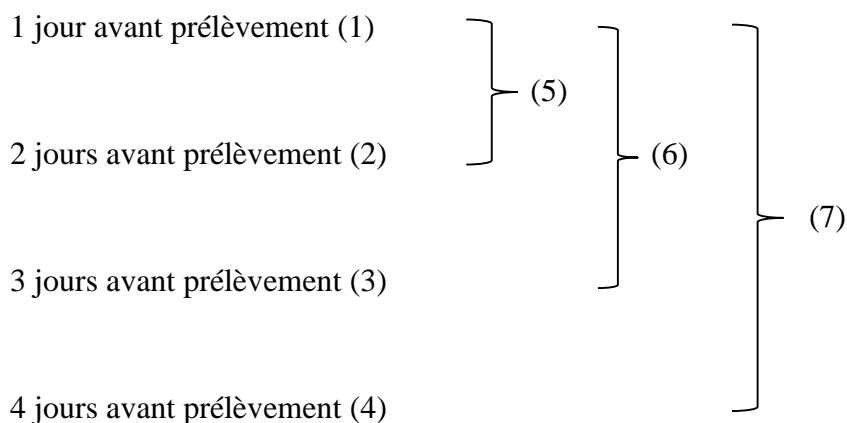
4.1) Temporalité entre le spectre fécal et l'ingestion de référence

Comme cela a été expliqué au point 1.3, la durée de transit des aliments dans le tube digestif des taurillons BBBC de cette expérimentation est inconnue.

Ainsi, différentes temporalités d'ingestion de référence ont été mises en relation avec le spectre infrarouge. L'analyse des performances de calibration indiquera quelle temporalité permet d'obtenir les meilleurs résultats, même si cela ne renseigne pas sur la durée réelle de transit des aliments chez le taurillon à l'engraissement.

Des ingestions moyennes sur plusieurs jours ont également été associées à chaque spectre. La prédiction d'une ingestion moyennée sur plusieurs jours permettrait une prédiction d'ingestion plus proche de l'ingestion moyenne des animaux, comme expliqué au point 3.3.

Valeur d'ingestion de référence :



Les quatre premiers scénarios associent aux spectres infrarouges des ingestions journalières calculées 1, 2, 3 et 4 jours avant le prélèvement de matières fécales.

Le scénario 5 associe aux spectres infrarouges des ingestions journalières de référence moyennes sur 48 heures, moyenne des ingestions calculées de la veille et l'avant-veille du prélèvement.

Le scénario 6 associe des ingestions journalières de référence moyennes sur 72 heures, moyenne des ingestions calculées des trois jours précédents le prélèvement.

Le scénario 7 associe des ingestions journalières de référence moyennes sur 96 heures, moyenne des ingestions calculées des quatre jours précédents le prélèvement.

4.2) Caractéristiques du spectre fécal

Influence de l'exposition des échantillons à l'air libre sur le spectre

Une analyse de la variance a été effectuée sur les principaux composants chimiques des matières fécales, cette analyse permet de tester l'homogénéité de la réponse infrarouge à la durée d'exposition à l'air libre des fèces. Les 72 échantillons étudiés représentent 3 séries de 24 échantillons de matières fécales.

Ces trois séries représentaient trois fractions d'un même échantillon placées à l'étuve à des heures différentes. Cela afin de déterminer si l'exposition des matières fécales à l'air libre avant étuvage modifiait la composition chimique de celles-ci (voir matériels et méthodes, point 8.2.1).

Des AV1 « heure de mise à l'étuve » – « composants chimiques » ont été réalisées (Tableau 19).

Tableau 19 : Valeurs statistiques des analyses d'échantillons étuvés à des heures différentes

	Moyenne h0	Moyenne h+3	Moyenne h+6	p-value
MSa %	94,35	94,97	94,87	0,006
MPT % MS	16,36	16,72	16,65	0,74
CT % MS	13,32	12,52	12,61	0,28
ADF % MS	32,47	32,30	32,28	0,90
NDF % MS	50,20	49,92	49,81	0,97
ADL % MS	9,28	9,30	9,34	0,98

- MSa : Matière sèche analytique
- MPT : Matières protéiques totales
- CT : Cendres totales
- ADF : Acid detergent fibre
- NDF : Neutral detergent fibre
- ADL : Acid detergent lignin

Seul le taux de matière sèche diffère de façon hautement significative. Les moyennes des autres constituants ne sont pas statistiquement différentes.

Influence de l'heure d'échantillonnage sur le spectre

L'influence de l'heure de prélèvement sur le spectre infrarouge a également été testée. Ainsi, durant trois jours, tous les taureaux ont été échantillonnés deux fois par jour, une fois le matin et une fois le soir (voir matériels et méthodes point 8.2.2). Les résultats de l'AV1 se trouvent dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Valeurs statistiques des analyses d'échantillons prélevés à des heures différentes

	Moyenne am	Moyenne pm	p-value
MSa %	93,08	93,22	0,35
MPT % MS	15,66	16,04	0,25
CT % MS	15,02	14,63	0,36
ADF % MS	32,96	32,93	0,96
NDF % MS	51,62	51,23	0,73
ADL % MS	9,50	9,65	0,52

Les pourcentages des principaux composés ont alors été testés, les AV1 « heure de prélèvement » – « composant chimique » montrent que l'heure de prélèvement n'a pas d'influence sur la composition chimique des matières fécales.

La composition chimique proximale de la matière sèche des matières fécales estimée par la spectroscopie infrarouge n'est pas influencée par le délai entre la prise de l'échantillon et son séchage, ni par l'heure de prélèvement de la matière fécale.

Une telle conclusion laisse à penser que le spectre fécal est insensible à ce délai et qu'une certaine souplesse de travail peut être adoptée lors de l'échantillonnage dans les élevages.

5) Calibration infrarouge

L'analyse de la qualité des modèles établis durant cette expérimentation se base sur trois critères de référence (RSQ, SECV, RPD).

Les cinq colonnes de la Figure 17 représentent les cinq facteurs ayant été modifiés pour créer les différentes combinaisons menant aux modèles de calibration (voir matériels et méthodes, point 8.3).

La présentation de l'ensemble des combinaisons et de leurs résultats est beaucoup trop fastidieuse. Une première combinaison a donc été établie par défaut.

L'étude des trois critères de référence sera présentée pour toutes les modalités de chacun des cinq facteurs pris un à un, afin de déterminer quelles sont les meilleures combinaisons à effectuer.

Chaque facteur sera discuté séparément, en gardant les modalités des autres facteurs identiques.

Spectres	Expression de l'ingestion	Pondération de l'ingestion par le poids	Temporalité de l'ingestion	Aliments pris en compte
spectre brut	Kg de MS	Aucune	-1	Mash seul
spectres moyennés sur 2 jours	VEVI	/ poids vif	-2	Mash + paille NIRS
spectres moyennés sur 3 jours		/ poids métabolique	-3	Mash + paille MOF
			-4	
			m2	
			m3	
			m4	

Figure 17 : Combinaison initiale des modalités

Afin de représenter le plus lisiblement possible les modalités choisies pour chaque facteur, celles-ci seront surlignées dans la couleur verte, par défaut pour commencer, puis en fonction des statistiques de calibration obtenues.

Les modalités de chaque facteur seront choisies sur base des statistiques de calibration, afin d'arriver au modèle le plus performant à la fin de ce procédé itératif.

5.1) Spectres de la base de données infrarouge.

Les spectres constituant la base de données infrarouge et leurs valeurs de référence ont été utilisés seuls ou moyennés (sur deux ou trois jours).

La Figure 18 représente les statistiques des modèles de calibration en fonction du traitement des spectres dans la base de données.

Spectres		Expression de l'ingestion	Pondération de l'ingestion par le poids	Temporalité de l'ingestion	Aliments pris en compte
	RSQ SECV RPD				
spectre brut	0,21 1,22 1,02	Kg de MS	Aucune	-1	Mash seul
spectres moyennés sur 2 jours	0,35 0,97 1,08	VEVI	/ poids vif	-2	Mash + paille NIRS
spectres moyennés sur 3 jours	0,41 0,88 1,13		/ poids métabolique	-3	Mash + paille MOF
				-4	
				m2	
				m3	
				m4	

Figure 18 : Effet de l'expression des spectres sur la qualité de la prédiction

Lorsque les spectres infrarouges individuels constituant la base de données sont moyennés sur trois jours consécutifs, les indicateurs de qualité de la calibration (R^2 , SECV et RPD) sont améliorés. Le R^2 augmente et le SECV diminue, augmentant la précision de l'estimation.

Les prochains modèles présentés seront donc établis avec des spectres moyennés sur trois jours consécutifs.

5.2) Expression de l'ingestion

Les mashes distribués aux animaux durant cette expérimentation ne possédaient pas tous la même densité énergétique nette.

L'ingestion (kg de MS) des animaux varie de façon très hautement significative et il a été établi que le type de mash était un facteur de variation, tout comme la période. Une piste avancée pour expliquer la différence d'ingestion, était que les animaux ingérant les rations les moins denses en énergie nette compensaient partiellement cette différence en augmentant leur ingestion.

Bien que variant également de façon très hautement significative durant l'expérimentation, l'ingestion d'énergie nette aurait donc tendance à être plus stable que l'ingestion de matière sèche. Néanmoins, l'expression de l'ingestion sous forme d'énergie nette permet de minimiser

l'impact de la paille sur l'ingestion. La densité énergétique de la paille étant bien inférieure à celle des mashes.

Les statistiques de calibration sont présentées à la Figure 19, pour ces deux types d'expression de l'ingestion, soit en MS, soit en VEVI.

Spectres	Expression de l'ingestion	Statistiques de calibration				Pondération de l'ingestion par le poids	Temporalité de l'ingestion	Aliments pris en compte
		RSQ	SECV	CV (%)	RPD			
spectre brut	Kg de MS	0,41	0,88	10,43	1,13	Aucune	-1	Mash seul
spectres moyennés sur 2 jours	VEVI	0,32	930	9,85	1,10	/ poids vif	-2	Mash + paille NIRS
spectres moyennés sur 3 jours						/ poids métabolique	-3	Mash + paille MOF
							-4	
							m2	
							m3	
							m4	

Figure 19 : Effet de l'expression de l'ingestion sur la qualité de la prédiction

Lorsque l'ingestion est exprimée sous forme de matière sèche, le R^2 ainsi que le RPD sont améliorés. Le SECV, sous forme de coefficient de variation est légèrement détérioré. Deux observations peuvent expliquer ce résultat :

- Le nombre d'échantillons de la base de données (VEVI) compte 48 spectres de moins (voir point 2).
- La variabilité des valeurs de référence (ingestion d'énergie nette) est moins importante que la variabilité d'ingestion de matière sèche, grâce au phénomène de compensation partielle expliqué au point 3.1.

Ainsi, la base de données plus grande et plus variable procure de meilleurs résultats de calibration. L'ingestion sera exprimée sur base de la MS dans les modèles de calibration suivants.

5.3) Pondération de l'ingestion par le poids

L'ingestion absolue (kg de MS / jour) des taurillons augmente tout au long de leur croissance. A l'inverse, leur ingestion relative (/ 100 kg de PV ou / kg de PM) diminue durant cette période (voir Figure 3).

Pour obtenir l'ingestion relative, les poids journaliers théoriques des animaux ont été calculés à partir des pesées hebdomadaires. Les ingestions journalières ont ensuite été divisées par ce poids théorique ^{^1} (poids vif) ou ^{^0,75} (poids métabolique).

Une imprécision sur l'ingestion relative est donc présente, alors que le calcul de l'ingestion absolue a été réalisé quotidiennement et de façon précise.

L'évolution de la qualité de la prédiction selon la pondération de l'ingestion est reprise à la Figure 20.

Spectres	Expression de l'ingestion	Pondération de l'ingestion par le poids	RSQ	SECV	CV (%)	RPD	Temporalité de l'ingestion	Aliments pris en compte
spectre brut	MS	kg de MS	0,41	0,879	10,43	1,13	-1	Mash seul
spectres moyennés sur 2 jours	VEVI	kg de MS / 100 kg de PV	0,61	0,175	9,96	1,16	-2	Mash + paille NIRS
spectres moyennés sur 3 jours		g de MS / kg de PM	0,61	7,54	9,18	1,19	-3	Mash + paille MOF
							-4	
							m2	
							m3	
							m4	

Figure 20 : Effet de la pondération de l'ingestion sur la qualité de la prédiction

Bien qu'une imprécision sur la mesure de l'ingestion relative soit présente, les modèles où l'ingestion est sous sa forme absolue (kg de MS / jour) sont les moins précis et les moins robustes.

Les meilleurs modèles semblent être ceux où l'ingestion des animaux est pondérée par le poids métabolique (g de MS / kg de PM), même si la différence avec la pondération par le poids vif (kg de MS / 100 kg de PV) est ténue.

Les R^2 obtenus en exprimant l'ingestion sous sa forme relative sont $> 0,5$, devenant acceptables. Les RPD sont quant à eux toujours trop faibles pour que le modèle soit utilisable en routine.

5.4) Temporalité de l'ingestion

La durée de transit des aliments chez le ruminant a été abordée dans la synthèse bibliographique (point 1.3). La durée exacte de transit n'est pas connue pour les BBBc de cette expérimentation.

Néanmoins, l'ingestion des animaux a été calculée quotidiennement. Différentes temporalités de l'ingestion par rapport au prélèvement de fèces ont pu être calculées grâce à ce suivi quotidien de l'ingestion (voir point 4.3).

Les différentes temporalités employées et leur impact sur les performances de calibration se trouvent à la figure 21.

Spectres	Expression de l'ingestion	Pondération de l'ingestion par le poids	Temporalité de l'ingestion	RSQ SECV RPD			Aliments pris en compte
				RSQ	SECV	RPD	
spectre brut	MS	Aucune	-1	0,61	7,54	1,19	Mash seul
spectres moyennés sur 2 jours	VEVI	/ poids vif	-2	0,64	6,35	1,33	Mash + paille NIRS
spectres moyennés sur 3 jours		g de MS / kg de PM	-3	0,70	6,20	1,42	Mash + paille MOF
			-4	0,65	6,56	1,45	
			m2	0,70	6,58	1,29	
			m3	0,73	6,05	1,38	
			m4	0,72	5,74	1,46	

Figure 21 : Effet de la temporalité de l'ingestion sur la qualité de la prédiction

Lorsque l'ingestion n'est pas moyennée, un temps de transit de trois jours semble fournir les meilleurs résultats (RSQ de 0,7 ; RPD de 1,42). Cependant, lorsque l'ingestion est moyennée sur trois ou quatre jours, les R^2 sont améliorés, tout comme les RPD lorsqu'un pas de temps de quatre jours est employé.

Cette amélioration des statistiques de calibration, lorsque l'ingestion est moyennée, est plus intéressante, car cela permet de prédire des ingestions plus représentatives de l'ingestion moyenne d'un taurillon sur une période de croissance donnée (voir point 3.3).

5.5) Aliments pris en compte

Comme expliqué au point 3.2, l'ingestion de paille par les taurillons est inconnue lors de cette expérimentation. Des ingestions théoriques de paille ont été calculées selon deux méthodes distinctes (voir matériels et méthodes, point 5.1). Les valeurs obtenues ont été comptabilisées dans l'ingestion totale des taurillons dans certains modèles.

Les effets de la prise en compte de l'ingestion de paille sur les statistiques de calibration sont visibles à la Figure 22.

Spectres	Expression de l'ingestion	Pondération de l'ingestion par le poids	Temporalité de l'ingestion	Aliments pris en compte	RSQ	SECV	RPD
spectre brut	MS	Aucune	-1	Mash seul	0,72	5,74	1,46
spectres moyennés sur 2 jours	VEVI	/ poids vif	-2	Mash + paille NIRS	0,60	5,34	1,31
spectres moyennés sur 3 jours		/ poids métabolique	-3	Mash + paille MOF	0,44	5,37	1,20
			-4				
			m2				
			m3				
			m4				

Figure 22 : Effet du choix du type d'aliment sur la qualité de la prédiction

Lorsque qu'une quantité théorique de paille s'ajoute à l'ingestion de mash, la qualité des modèles de calibration est détériorée.

Ces ingestions théoriques ont été calculées par type de mash, en ne prenant pas en compte les variations d'ingestion de paille de chaque individu. La prédiction de l'ingestion de paille issue de la méthode FNIRS est très peu précise (voir matériels et méthodes, point 5.1),

tout comme la méthode MOF, qui prend arbitrairement comme hypothèse de base une ingestion moyenne de paille de 500 grammes de MS.

C'est donc probablement un manque de précision sur la mesure de paille qui est à l'origine de la dégradation des performances de calibration.

5.6) Résumé

L'ensemble des modalités permettant d'obtenir les meilleures calibrations sont résumées dans le Tableau 21. Les trois indicateurs de qualité de la calibration y figurent également.

Tableau 21 : Modalités permettant les meilleures calibrations

Spectres	Expression de l'ingestion	Pondération de l'ingestion par le poids	Temporalité de l'ingestion	Aliments pris en compte	RSQ	SECV	RPD
Moyennés sur 3 jours	MS	/ poids métabolique	Ingestion moyenne 4 jours avant prélèvement	Mash seul	0,72	5,74	1,46

- Le R^2 obtenu avec ce qui semble la meilleure combinaison de modalités des différents facteurs est satisfaisant, 72% de la variabilité de l'ingestion prédite est déterminée par l'équation de calibration.
- Le SECV, rapporté à la moyenne (coefficient de variation) s'élève à 7,2%, ce qui est assez proche des résultats obtenus par Decruyenaere *et al.* (2004), qui obtenaient un CV de 6,7% lors de la calibration de modèles de prédiction des quantités ingérées au pâturage
- Le ratio RPD est largement inférieur à 3, les calibrations infrarouges développées à partir de cette base de données ne permettent donc pas d'établir des discriminations entre les différents taureaux sur base de leur ingestion.

Une représentation graphique des valeurs de référence et des valeurs prédites par ce modèle se trouve à la figure 23.

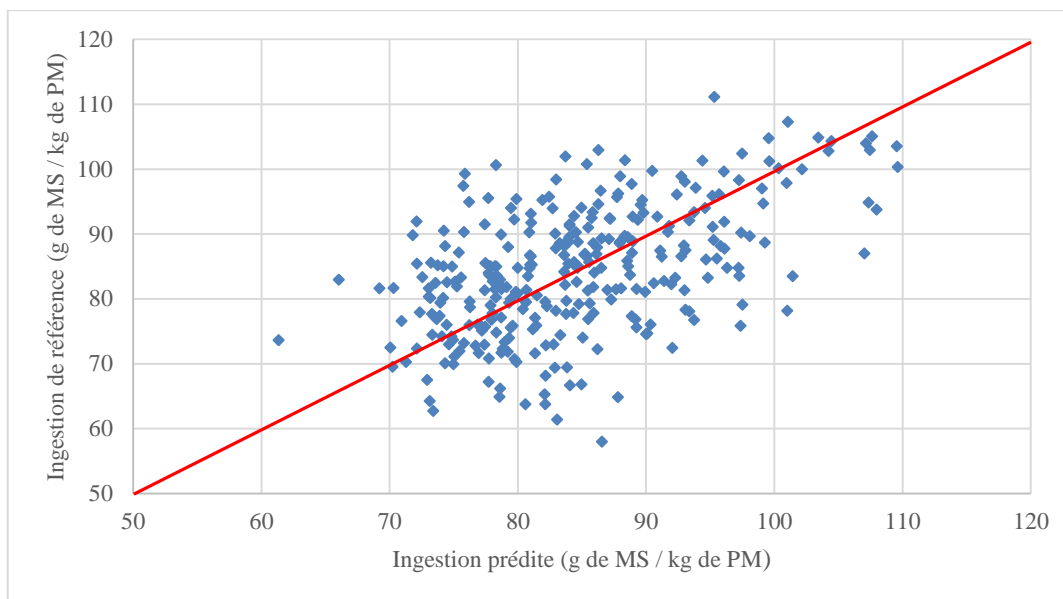


Figure 23 : Corrélation entre ingestion prédite et ingestion calculée

La dispersion des points autour de la bissectrice est assez importante comme l'ont prouvé les valeurs statistiques de calibration. A ce stade, il est impossible de prédire l'ingestion de BBBc grâce à ce modèle.

Il est néanmoins intéressant de se demander si la qualité de la prédiction diffère selon le mash ingéré. Une analyse de la variance à un critère de classification (mash) a été réalisée sur les carrés des écarts entre les valeurs d'ingestion prédites et calculées (Tableau 22).

Tableau 22 : Analyse de variance de la précision du modèle utilisé en fonction du type de mash

Mash	Amidon	Fibre	Lipide	Pectine	p-value
Variance	0,79	0,63	0,85	1,02	0,23

Bien que l'ingestion de mash fibreux semble être prédite de façon plus précise, la valeur moyenne des carrés des écarts (variance) n'est pas impactée par le type de mash.

5.7) Base de données élargie

Une solution pour améliorer les performances des calibrations serait l'emploi d'une base de données de référence plus grande et plus variable. Cet aspect est discuté au point 6.2. Ainsi, de nouveaux modèles ont été établis, des spectres et leurs valeurs d'ingestion de référence, issus du CRA-W, ont été ajoutés aux spectres de cette expérimentation pour former une nouvelle base de données.

Cette base de données, extérieure à ce travail, compte 2214 spectres infrarouges. La gamme des ingestions associées à ces spectres est comprise entre 24 et 163 grammes / kg de PM. La variabilité de l'ingestion est donc assez importante. Les animaux excréteurs sont de tous types : bovins, ovins, en climat tempéré et tropical. Les rations ingérées étaient majoritairement à base de fourrage.

La même combinaison de modalités qu'au point 5.6 a été choisie. Les indices de qualité de ce modèle comptant une base de données élargie sont repris au Tableau 23.

Tableau 23 : Modalités utilisées et indices de qualité du modèle avec base de données élargie

Spectres	Expression de l'ingestion	Pondération de l'ingestion par le poids	Temporalité de l'ingestion	Aliments pris en compte	RSQ	SECV	RPD
Moyennés sur 3 jours	Kg de MS	/ poids métabolique	Ingestion moyenne 4 jours avant prélèvement	Mash seul	0,90	9,03	2,70

- Le R^2 obtenu est très satisfaisant, 90% de la variabilité de l'ingestion prédite est déterminée par l'équation de calibration.
- Le SECV, rapporté à la moyenne (coefficient de variation) s'élève à 11%. La précision n'est donc pas améliorée suite à l'élargissement de la base de données.
- Le ratio RPD est supérieur à 2,4, les calibrations infrarouges développées à partir de cette base de données élargie permettent un screening grossier, les animaux d'un lot pourraient être classés en plusieurs catégories selon leur ingestion.

L'amélioration du RPD est directement liée à l'augmentation de la variabilité. Pour rappel, le RPD représente le rapport entre la déviation standard de y (variabilité) et l'erreur standard de prédiction. Si la SD augmente, le RPD s'améliore.

Ainsi, la robustesse du modèle est améliorée avec de nouvelles données. La précision, quant à elle, se dégrade.

6) Discussion générale

Les trois points importants pour obtenir de bonnes performances de calibration sont repris et discutés un à un ci-dessous.

6.1) Nombre de spectres dans la base de données.

Le nombre de spectres constituant la base de données influence fortement les performances de calibration. A priori, les 304 spectres utilisés lors de cette expérimentation ne paraissent pas suffisants pour obtenir des modèles suffisamment robustes.

Un rythme d'échantillonnage plus soutenu aurait permis d'obtenir un plus grand nombre de spectres lors de ce travail. Néanmoins, des statistiques de calibration satisfaisantes ont pu être obtenues lors d'expérimentations réalisées par Decruyenaere *et al.* (2004) comportant un plus faible nombre de spectres. Ces modèles de prédiction de l'ingestion de ruminants au pâturage étaient satisfaisants avec un nombre plus restreint d'échantillons ($N = 139$; $RSQ = 0,98$; $RPD = 4,56$; $SECV = 6,7\%$).

6.2) Variabilité des valeurs de référence

L'utilisation de 4 types de mash différents, ainsi que l'organisation de cette expérience sur une période assez longue a permis d'augmenter la variabilité des valeurs de référence. En effet, ces deux facteurs ont eu un effet très hautement significatif sur l'ingestion des animaux.

Néanmoins, la collecte des matières fécales n'a pas été réalisée de façon homogène durant cette expérimentation. L'ensemble de la variabilité des valeurs d'ingestion n'a donc pas pu être associée aux spectres fécaux car la période deux a été moins riche en prélèvements de fèces que la période quatre.

Comme cela a été démontré au point 5.7, l'augmentation de la variabilité des valeurs de référence, l'emploi d'aliments grossiers, l'étude d'autres types et d'autres races d'animaux permettent d'établir des modèles de meilleure qualité.

6.3) Précision du calcul des valeurs de référence

L'ingestion de mash a été calculée de manière assez précise durant ce travail. Néanmoins deux sources d'imprécision étaient présentes lors de l'expression de l'ingestion. La première étant l'ingestion de paille (non calculée), la deuxième étant le poids quotidien des animaux (pesée hebdomadaire) utilisés lors du passage aux ingestions relatives.

Ingestion de paille

La ration des taurillons était composée de mash et de paille, dont la quantité ingérée n'a pas pu être calculée lors de ce travail.

L'imprécision sur le calcul de l'ingestion totale sera d'autant plus grande que la quantité de paille n'ayant pas été prise en compte est importante. Pour pallier à ce manque d'informations, une quantité théorique de paille a été calculée, de deux manières différentes. Ces ingestions théoriques de paille étaient assez approximatives, induisant une nouvelle imprécision sur l'ingestion totale des animaux.

Au vu des résultats obtenus en prenant ou non en compte la paille dans l'ingestion totale, l'imprécision due à sa non prise en compte était moins importante que l'imprécision induite par l'ajout d'une quantité de paille théorique dans l'ingestion totale.

Calcul du poids

Le poids des animaux n'a pas pu être mesuré de façon quotidienne. Afin d'obtenir un poids journalier permettant le calcul de l'ingestion pondérée quotidienne, des GQM moyens étaient calculés entre deux pesées. Cette méthode a probablement induit une imprécision par rapport à une pesée quotidienne des animaux.

Les performances des modèles ont toutefois été meilleures lorsque l'ingestion était présentée sous sa forme pondérée, malgré l'imprécision présente sur son calcul.

7) Conclusion et perspectives

L'étude statistique des modèles établis a permis de démontrer l'intérêt de travailler avec des couples « spectres - valeurs de référence » moyennés sur trois jours dans la base de données. Cette condition est probablement la conséquence de la variabilité journalière, ou « bruit de fond », présent chez les taurillons. Moyenner les données ne diminue pas la variabilité mais la valeur de référence associée au spectre est de meilleure qualité.

Les modèles où l'ingestion était sous forme relative étaient les plus prometteurs. La conséquence directe de cette conclusion est que si l'ingestion totale doit être déterminée, le poids de l'animal doit être connu, calculé par interpolation linéaire entre deux pesées, comme durant ce travail. Ce poids estimé sera d'autant plus précis que l'intervalle entre deux pesées sera court et que la dynamique de croissance des animaux sera stable, conditions difficiles à remplir en ferme. La solution la plus simple serait d'échantillonner les fèces dans une période précédant ou suivant de près une pesée de l'animal.

Comme expliqué au point 5.6, les performances de calibration obtenues avec une base de données propre à cette expérimentation montrent que ces modèles ne sont pas suffisamment robustes en l'état. L'ingestion de taurillons BBBc en croissance, nourris *ad libitum* en mash et en paille, ne peut donc pas être prédite en n'utilisant que la base de données de cette expérimentation.

Cependant, le travail réalisé a permis d'obtenir une base spectrale de taille correcte, pouvant être conservée et ajoutée à d'autres spectres issus de nouvelles expériences. Quelques perspectives peuvent être avancées dans l'hypothèse de la poursuite d'expériences de ce type dans le futur, afin d'augmenter la variabilité des valeurs de référence.

La variabilité de l'ingestion a pu être renforcée par l'augmentation du poids vif moyen des taurillons. A la fin de l'expérimentation il était d'environ 512 kg (Tableau 7). La poursuite de l'essai jusqu'au poids vif moyen d'environ 650 kg aurait permis d'obtenir des valeurs d'ingestion absolue plus élevées et d'ingestion relative plus faibles (Figures 13 et 14). L'introduction d'autres sources de variabilité aurait également permis d'améliorer les modèles (voir point 5.7).

Les valeurs d'ingestion pourraient être diminuées de manière forcée, en distribuant une quantité d'aliments inférieure à la capacité d'ingestion de l'animal. D'autres races bovines et d'autres types de ration pourraient également être utilisés afin de tester ces facteurs sur l'ingestion. A noter que l'emploi de rations « humides », type maïs et herbe ensilage, limiterait l'ingestion de paille, et donc l'imprécision du calcul de l'ingestion.

Une perspective pour améliorer la précision du calcul de l'ingestion, serait de supprimer la paille mise à disposition dans le râtelier, et sous forme de litière. Un mash contenant une proportion connue de paille, qui permettrait au bovin de ruminer suffisamment, faciliterait le calcul de l'ingestion, paille et mash confondus. La condition nécessaire étant que l'animal ne trie pas la ration proposée, auquel cas une nouvelle imprécision serait introduite.

Une auge double, contenant d'un côté le mash et de l'autre côté la paille, pourrait être installée à l'avant des boxes. Un calcul de l'ingestion des deux aliments pourrait être effectué, à condition que la litière soit toujours dépourvue de paille.

Cette expérience a également prouvé qu'une exposition de quelques heures à l'air libre des fèces ne semble pas influencer sa composition chimique, tout comme son heure d'émission au cours de la journée. Ces deux conclusions permettraient un échantillonnage plus souple et moins contraignant, donc plus facile à réaliser avec un rythme hebdomadaire plus soutenu.

L'ingestion des taurillons a été exprimée sous forme d'énergie (VEVI). D'autres expressions de l'ingestion pourraient être testées. L'ingestion de fibre non digestible pourrait être calculée et servir de valeur de référence aux modèles établis, à condition de connaître la quantité de paille ingérée. En effet, l'impact de la paille sur la quantité de fibre ingérée est plus important que sur la quantité d'énergie ingérée, l'erreur sur la valeur d'ingestion serait alors plus grande si la paille n'était pas prise en compte dans ce type de modèles.

Toutes ces pistes permettraient d'augmenter le nombre d'échantillons, la variabilité des valeurs de référence ainsi que la précision des mesures de l'ingestion.

IV) Bibliographie

- Allen, M. S., 2014. Drives and limits to feed intake in ruminants. *Animal Production Science* 54 (10) 1513-1514.
- AWE, 2015. Station bovine de suivi de performances ATH, <http://www.awenet.be/awe/UserFiles/file/Fascicule%202015%20FR.pdf>, (20/03/2020).
- Baumont R., Deswysen A., 1991. Mélange et propulsion du contenu réticulo-ruminal. *Reprod. Nutr. Develop.*, 31, 335-359.
- Bertrand, D. & Dufour, E., 2006. *La spectroscopie infrarouge et ses applications analytiques*, 2^e ed. Paris: Lavoisier.
- Bradford, B. J., & Allen, M. S. 2008. Negative energy balance increases periprandial ghrelin and growth hormone concentrations in lactating dairy cows. *Domestic Animal Endocrinology*, 34(2), 196–203.
- Cabral I S., J A G. Azevêdo J A G., Pina D S., Pereira L G R., de Almeida F M., Souza L L. & de Lima R F., 2017. Evaluation of internal markers as determinants of fecal dry matter. *Seminaire: Sciences agronomiques*, Londres 38, (5), 3331-3340.
- Cécillon L., 2009. *Quels indicateurs pour évaluer la qualité de sols forestiers soumis à des contraintes environnementales fortes ?*. Thèse de doctorat: Université Joseph Fourier de Grenoble (France),
- Chesworth J., Guérin H., Scavée E., 1996. *L'alimentation des ruminants*, 1^{ère} ed. Paris: Maisonneuve et Larose
- Chilliard Y., Bocquier F., Delavaud C., Faulconnier Y., Bonnet M., Guerre-millo M., Martin P. & Ferlay A., 1999. La leptine chez le ruminant. Facteurs de variation physiologiques et nutritionnels. *INRA Prod. Anim.*, 12 (3), 225-237.
- CVB, 2012. *CVB Feed Tables 2011 : Chemical compositions and nutritional values of feed materials. Product board animal feed*, Zoetermeer, Pays-Bas.
- D'Mello J.P.F., 2000. *Farm animal metabolism and nutrition*. Oxon: CABI publishing.
- de Souza J., Batistel F., Welter KC., Silva MM., Costa DF. & Santos FAP., 2015. Evaluation of external markers to estimate fecal excretion, intake, and digestibility in dairy cows. *Trop Anim Health Prod*, 47:265–268.
- de Souza R. A., Tempelman R. J., Allen M. S. & VandeHaar M. J., 2019. Updating predictions of dry matter intake of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Sciences*, 102:7948–7960.
- Decruyenaere V., Peters M., Stilmant D., Lecomte Ph. & Dardenne P., 2003. Near infrared reflectance spectroscopy applied to faeces to predict dry matter intake of sheep under grazing, comparison with n-alkanes and direct biomass measurement methods. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 3, 471-476.

- Decruyenaere V., De Visser M., Stilmant D., Clément C. & Sinnaeve G., 2004. Faecal Near infrared reflectance spectroscopy for ruminant feed intake prediction. *Grassl.Sci.Eur*, 9.,1034-1036.
- Decruyenaere V., Buldgen A., Stilmant D., 2009. Factors affecting intake by grazing ruminants and related quantification methods: a review. *Biotechnology, agronomy, society and environment*, 13 (4), 559-573.
- Decruyenaere V., 2015. *Estimation of diet digestibility and intake by grazing ruminants through near infrared reflectance spectroscopy analysis of faeces. Application in various contexts of livestock production.* Thèse de doctorat : Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège (Belgique).
- Dixon R. & Coates D., 2009. Near infrared spectroscopy of faeces to evaluate the nutrition and physiology of herbivores. *Journal of near Infrared Spectroscopy*, 17, 1–31.
- Dourmad J-Y., 2011. Phénotypage de l'efficacité alimentaire du porc, *INRA - Agrocampus Ouest*, https://www6.inra.fr/groupe-filieres/content/download/4153/38428/version/2/file/7_Dourmad_Efficacit%C3%A9+alimentaire.pdf, (17/05/2019).
- Dulphy J.P., Martin-Rosset W., Jouany J.P., 1995. Ingestion et digestion comparées des fourrages chez différentes espèces d'herbivores. *INRA, Prod. Anim.*, 8 (4), 293-307.
- Genot V., BOCK L., DARDENNE P. & Gilles COLINET, 2014. L'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge en analyse de terre. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*,18(2), 247-261.
- Hayashida T., Murakami K., Mogi K., Nishihara M., Nakazato M., Mondal MS., Horii Y., Kojima M., Kangawa K. & Murakami N.,2001. Ghrelin in domestic animals: distribution in stomach and its possible role. *Domestic Animal Endocrinology*, 21(1), 17–24.
- Herd R., Oddy V. H. & Richardson E. C., 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 1. Review of potential mechanisms. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(5), 423.
- Jarrige, R., Ruckebusch Y., Demarquilly C.,1995. *Nutrition des ruminants domestiques : Ingestion et digestion.* Paris: INRA.
- Lachenal, G., 2008. NIR spectroscopy analysis and its applications to polymers analysis. *Analisis*, 26(4), 20–28.
- Lassen J, Thomassen J.R, Hansen RH, Nielsen G.G.B, Olsen E, Stentebjerg P.R.B, Hansen N.W & Søren B, 2018. Individual measure of feed intake on in-house commercial dairy cattle using 3D camera system. *The World Congress on Genetics Applied to Livestock Production vol. Technologies - Novel Phenotypes*, 635.
- Lessire F., Dufrasne I. & Decruyenaere V., 2015. Evaluation of the dry matter ingested by grazing dairy cows milked by an automatic milking system by analysis of faeces by near infra-red spectrometry. *Renc. Rech. Ruminants*, 22.

- M. Meuret, Nicole Bartiaux-Thill, A. Bourbouze, Sophie Rosenberger, Marie Vernerey, *et al.*, 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*, INRA/EDP Sciences, 34 (2), pp.159-180.
- Minet O., Ferber F., Jacob L., Lecler B., Agneessens R., Cugnon T., Decruyenaere V., Genot V., Gofflot S., Pitchugina E., Planchon V., Renneson M., Sinnaeve G., Wavreille B., Dardenne P., Baeten V., 2017. *La spectrométrie proche infrarouge. Une technologie rapide, précise et écologique pour déterminer la composition et la qualité des produits agricoles et alimentaires*. Gembloux: REQUASUD.
- Nozieres, M.-O. Dulphy J.-P., Peyraud J.-L., Poncet C., Baumont R., 2007. La valeur azotée des fourrages. Nouvelles estimations de la dégradabilité des protéines dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle : conséquences sur les valeurs PDI. *INRA Prod. Anim.*, 20 (2), 109-118.
- Poppi, D. P., T. P. Hughes, & P. J. L'huillier, 1987. Intake of pasture by grazing ruminants. *Livestock Feeding at Pasture*, 55–64.
- Van Nespen L., Maitre Ph., Paruelle J.L., 1997. Niveaux d'ingestion et efficacité des apports énergétiques des taurillons à l'engrais recevant une ration à base d'ensilage de maïs. *Renc. Rech. Ruminants*, 4, 79 - 82.
- Radar SA, 2006. Table Radar, Deinze, Belgique.
- Rinnan, R. & Rinnan, Å., 2007. Application of near infrared reflectance (NIR) and fluorescence spectroscopy to analysis of microbiological and chemical properties of arctic soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7), 1664–1673.
- Sauvant D., Nozière P., 2013. Rénovation des unités alimentaires des ruminants: les principales relations utilisées pour le calcul des apports alimentaires. *Renc. Rech. Ruminants*, 20, 33-40.
- SCAM, 2020. <http://www.scam-sc.be/Innovation/Recherche-Developpement/Beef-Center.aspx>, (14/03/2020).
- SPF économie, 2019. <https://economie.fgov.be/fr/publications/etude-de-la-composition-du>, (05/05/2020).
- Wallén S. E., Prestløkken E., Meuwissen T. H. E., McParland S. & Berry D. P., 2018. Milk mid-infrared spectral data as a tool to predict feed intake in lactating Norwegian Red dairy cows. *Journal of Dairy Sciences*, 101:6232–6243.
- www.montpellier-supagro.fr, "Prévision des quantités de fourrages ingérés par un ruminant." https://www.supagro.fr/ress-tice/sciences_animales/ingestion/co/_gc_facteurs_variation.html (05/04/2019).
- Tixier-Boichard M., Bordas A., Renand G. & Bidanel J.P., 2002. Residual food consumption as a tool to unravel genetic components of food intake. *Proc. 7th World Congr. Genet. Appl. Livest. Prod. Institut national de la Recherche Agronomique*, Montpellier, France. 10-06.

- Velásquez A. V., da Silva G. G., Sousa D. O., Oliveira C. A., Martins C. M. M. R., dos Santos P. P. M., Balieiro J. C. C., Rennó F. P. & Fukushima R. S., 2017. *Journal of Dairy Sciences*, 101:5890–5901.
- Vinet A., Krauss D., Andre C., & Renand G, 2008. Relations génétiques entre les capacités d'ingestion de taurillons, boeufs, génisses et vaches. *Renc. Rech. Ruminants*, 15,267-270.
- Vilariño M., Métayer J.-P., Mahaut B., Bouvarel I., Lescoat P., Chartrin P., Fournis Y., Hogrel P., Bonnal L. & Bastianelli D., 2016. Caractériser la valeur nutritionnelle des aliments par des méthodes innovantes. *Innovations Agronomiques*, 49, 163-177.
- Wathelet, B., Paquot M., & Gillet A Richel, 2011. *Chimie théorique et physique appliquée à l'analyse structurale des biomolécules*. Document non publié, Unité de chimie Biologique Industrielle, Gembloux-Agro-Bio-Tech.
- Wesley, I., 2003. Chemometric Localization Approach to NIR Measurement of Apparent Amylose Content of Ground Wheat, *Cereal Chemistry*, 80 (4),462-467.
- Weston, R.,1996. Some aspects of constraint to forage consumption by ruminants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 47(2), 175.
- Zereu, G., 2016. Factors Affecting Feed Intake and Its Regulation Mechanisms in Ruminants A Review. *International Journal of Livestock Research*, 6(04), 20-40.

V) Annexes

Statistiques de calibration des modèles établis avec les données de l'expérimentation

Valeur associée au spectre	Ingestion mash seul (g de MS)								
	Base de données brute			Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing j-4	0,51	981,08	1,14	0,51	846,04	1,21	0,32	907,84	1,10
Ing j-3	0,49	978,21	1,14	0,53	855,19	1,18	0,59	813,20	1,19
Ing j-2	0,23	1123,16	1,04	0,40	983,04	1,05	0,51	820,46	1,17
Ing j-1	0,21	1216,03	1,02	0,35	971,21	1,08	0,41	878,66	1,13
Ing moy 4jrs	0,36	871,80	1,09	0,51	816,17	1,14	0,57	798,21	1,16
Ing moy 3 jrs	0,32	922,73	1,06	0,47	861,57	1,10	0,55	793,03	1,18
Ing moy 2 jrs	0,26	1012,81	1,04	0,32	939,55	1,05	0,53	819,29	1,16
Ing j-4 / PV	0,50	1,81	1,35	0,60	1,65	1,34	0,71	1,51	1,43
Ing j-3 / PV	0,48	1,79	1,32	0,55	1,61	1,31	0,64	1,49	1,34
Ing j-2 / PV	0,35	2,03	1,19	0,46	1,69	1,21	0,58	1,52	1,26
Ing j-1 / PV	0,33	2,22	1,18	0,43	1,71	1,23	0,61	1,75	1,16
Ing j-4 / PM	0,51	7,94	1,35	0,58	7,22	1,34	0,65	6,56	1,45
Ing j-3 / PM	0,44	8,24	1,27	0,63	7,08	1,32	0,70	6,20	1,42
Ing j-2 / PM	0,34	9,23	1,18	0,42	7,91	1,16	0,64	6,35	1,33
Ing j-1 / PM	0,31	10,18	1,16	0,42	7,80	1,21	0,61	7,54	1,19
Ing moy 4 jrs / PV	0,60	1,37	1,46	0,60	1,38	1,38	0,68	1,40	1,36
Ing moy 3 jrs / PV	0,51	1,50	1,36	0,56	1,45	1,33	0,74	1,43	1,33
Ing moy 2 jrs / PV	0,43	1,73	1,27	0,49	1,57	1,26	0,65	1,55	1,24
Ing moy 4 jrs / PM	0,57	6,13	1,43	0,58	6,21	1,35	0,72	5,74	1,46
Ing moy 3 jrs / PM	0,51	6,66	1,34	0,53	6,62	1,28	0,73	6,05	1,38
Ing moy 2 jrs / PM	0,41	7,79	1,25	0,46	7,24	1,22	0,70	6,58	1,29

Ingestion mash seul (VEVl)									
Valeur associée au spectre	Base de données brute			Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing j-4	0,10	1115,00	0,98	0,21	880,80	1,11	0,60	729,14	1,16
Ing j-3	0,09	1184,33	0,97	0,13	941,86	1,05	0,18	903,34	1,07
Ing j-2	0,07	1272,89	0,97	0,13	1005,15	1,06	0,17	896,15	1,07
Ing j-1	0,11	1334,44	0,99	0,19	1028,75	1,08	0,32	929,73	1,10
Ing moy 4jrs	0,14	939,90	0,96	0,64	764,24	1,14	0,25	718,68	1,11
Ing moy 3 jrs	0,13	1029,01	0,96	0,17	889,35	1,07	0,51	831,05	1,13
Ing moy 2 jrs	0,12	1127,68	0,97	0,17	959,48	1,08	0,29	892,08	1,09
Ing j-4 / PV	0,10	2,08	1,03	0,23	1,60	1,09	0,31	1,27	1,10
Ing j-3 / PV	0,19	2,15	1,03	0,12	1,72	1,05	0,22	1,59	1,09
Ing j-2 / PV	0,05	2,35	1,00	0,08	1,82	1,03	0,35	1,52	1,05
Ing j-1 / PV	0,24	2,37	1,06	0,23	1,73	1,09	0,42	1,40	1,17
Ing j-4 / PM	0,11	9,32	1,03	0,24	7,14	1,11	0,36	5,53	1,15
Ing j-3 / PM	0,19	9,73	1,03	0,12	7,74	1,05	0,20	7,15	1,09
Ing j-2 / PM	0,06	10,72	1,01	0,10	8,32	1,04	0,34	6,64	1,10
Ing j-1 / PM	0,12	11,22	1,03	0,15	8,31	1,06	0,40	6,64	1,15
Ing moy 4 jrs / PV	0,26	1,51	1,06	0,57	1,23	1,10	0,20	1,11	1,07
Ing moy 3 jrs / PV	0,26	1,66	1,09	0,12	1,52	1,05	0,34	1,38	1,12
Ing moy 2 jrs / PV	0,29	1,89	1,07	0,20	1,63	1,07	0,38	1,35	1,15
Ing moy 4 jrs / PM	0,18	6,80	1,04	0,57	5,54	1,13	0,27	4,81	1,12
Ing moy 3 jrs / PM	0,27	7,47	1,08	0,14	6,89	1,06	0,36	6,09	1,16
Ing moy 2 jrs / PM	0,27	8,70	1,06	0,20	7,59	1,06	0,38	6,33	1,14

Valeur associée au spectre	Ingestion mash + paille FNIRS (g de MS)								
	Base de données brute			Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing j-4	0,57	1044,42	1,04	0,53	823,40	1,20	0,70	678,30	1,34
Ing j-3	0,37	1093,74	1,01	0,43	889,93	1,11	0,59	753,55	1,26
Ing j-2	0,17	1206,80	0,96	0,34	947,56	1,05	0,65	757,58	1,20
Ing j-1	0,20	1255,77	0,97	0,05	1014,18	1,00	0,43	813,64	1,17
Ing moy 4jrs	0,49	928,57	0,96	0,43	743,33	1,16	0,64	649,82	1,26
Ing moy 3 jrs	0,25	1015,32	0,93	0,41	841,94	1,08	0,71	734,28	1,22
Ing moy 2 jrs	0,19	1096,67	0,93	0,05	953,84	1,00	0,40	784,68	1,16
Ing j-4 / PV	0,28	4,36	1,13	0,73	1,56	1,28	0,87	3,77	1,94
Ing j-3 / PV	0,40	1,96	1,19	0,47	1,64	1,24	0,57	1,39	1,39
Ing j-2 / PV	0,27	2,12	1,13	0,42	1,68	1,17	0,44	1,39	1,26
Ing j-1 / PV	0,23	2,22	1,10	0,31	1,64	1,13	0,46	1,34	1,28
Ing j-4 / PM	0,38	8,67	1,18	0,50	7,07	1,26	0,53	6,25	1,31
Ing j-3 / PM	0,38	8,81	1,17	0,49	7,46	1,21	0,59	6,08	1,40
Ing j-2 / PM	0,25	9,61	1,12	0,36	7,75	1,13	0,46	6,21	1,25
Ing j-1 / PM	0,22	10,31	1,07	0,21	7,96	1,06	0,50	6,13	1,26
Ing moy 4 jrs / PV	0,46	1,43	1,27	0,60	1,28	1,29	0,57	1,25	1,28
Ing moy 3 jrs / PV	0,42	1,56	1,23	0,44	1,40	1,25	0,53	1,25	1,37
Ing moy 2 jrs / PV	0,33	1,78	1,15	0,37	1,53	1,17	0,49	1,30	1,30
Ing moy 4 jrs / PM	0,48	6,33	1,24	0,59	5,58	1,31	0,60	5,34	1,31
Ing moy 3 jrs / PM	0,43	6,96	1,20	0,45	6,50	1,20	0,55	5,61	1,35
Ing moy 2 jrs / PM	0,33	8,01	1,14	0,44	7,11	1,13	0,56	5,94	1,27

Ingestion mash + paille FNIRS (VEVI)									
Valeur associée au spectre	Base de données brute			Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing j-4	0,12	1138,31	0,99	0,23	903,11	1,12	0,57	739,05	1,19
Ing j-3	0,10	1207,34	0,98	0,14	966,33	1,06	0,20	926,64	1,08
Ing j-2	0,07	1289,56	0,98	0,15	1025,55	1,07	0,18	913,23	1,08
Ing j-1	0,12	1352,62	1,00	0,19	1047,62	1,09	0,33	946,61	1,11
Ing moy 4jrs	0,15	953,51	0,97	0,64	779,91	1,15	0,61	710,90	1,15
Ing moy 3 jrs	0,14	1043,66	0,97	0,18	909,10	1,08	0,52	850,07	1,14
Ing moy 2 jrs	0,12	1140,72	0,98	0,18	978,21	1,08	0,30	908,42	1,10
Ing j-4 / PV	0,11	2,12	1,04	0,24	1,64	1,10	0,34	1,28	1,13
Ing j-3 / PV	0,20	2,20	1,04	0,13	1,76	1,05	0,24	1,62	1,10
Ing j-2 / PV	0,05	2,39	1,01	0,09	1,85	1,04	0,31	1,49	1,09
Ing j-1 / PV	0,25	2,40	1,07	0,23	1,75	1,09	0,43	1,40	1,18
Ing j-4 / PM	0,12	9,52	1,04	0,26	7,33	1,12	0,38	5,59	1,17
Ing j-3 / PM	0,20	9,94	1,04	0,13	7,94	1,06	0,22	7,33	1,11
Ing j-2 / PM	0,06	10,89	1,01	0,11	8,46	1,05	0,36	6,78	1,10
Ing j-1 / PM	0,13	11,38	1,04	0,27	8,24	1,09	0,41	6,72	1,17
Ing moy 4 jrs / PV	0,13	1,57	1,04	0,57	1,25	1,12	0,24	1,10	1,10
Ing moy 3 jrs / PV	0,27	1,69	1,09	0,13	1,55	1,06	0,69	1,37	1,15
Ing moy 2 jrs / PV	0,29	1,92	1,07	0,12	1,69	1,05	0,38	1,36	1,17
Ing moy 4 jrs / PM	0,25	7,11	1,02	0,60	5,54	1,16	0,31	4,80	1,15
Ing moy 3 jrs / PM	0,28	7,63	1,09	0,15	7,04	1,07	0,38	6,28	1,16
Ing moy 2 jrs / PM	0,14	9,06	1,04	0,24	7,72	1,07	0,39	6,46	1,15

Valeur associée au spectre	Ingestion mash + paille MOF (g de MS)								
	Base de données brute			Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing j-4	0,49	1033,71	1,01	0,50	816,25	1,15	0,68	669,32	1,29
Ing j-3	0,36	1070,59	1,00	0,41	860,40	1,10	0,56	738,43	1,23
Ing j-2	0,13	1195,96	0,95	0,04	969,05	1,00	0,33	781,49	1,12
Ing j-1	0,19	1237,34	0,96	0,05	998,03	0,99	0,42	801,73	1,15
Ing moy 4jrs	0,46	929,65	0,92	0,49	721,17	1,14	0,60	642,67	1,20
Ing moy 3 jrs	0,24	988,22	0,92	0,38	834,92	1,05	0,43	730,68	1,18
Ing moy 2 jrs	0,16	1084,01	0,92	0,04	933,10	0,99	0,39	759,00	1,16
Ing j-4 / PV	0,35	1,93	1,15	0,48	1,57	1,21	0,87	3,75	1,94
Ing j-3 / PV	0,37	1,93	1,16	0,44	1,59	1,22	0,53	1,36	1,34
Ing j-2 / PV	0,23	2,11	1,10	0,30	1,65	1,13	0,45	1,37	1,20
Ing j-1 / PV	0,21	2,21	1,07	0,26	1,62	1,10	0,44	1,32	1,22
Ing j-4 / PM	0,34	8,54	1,15	0,38	7,01	1,19	0,62	6,29	1,21
Ing j-3 / PM	0,35	8,69	1,14	0,29	7,37	1,16	0,56	6,02	1,33
Ing j-2 / PM	0,21	9,55	1,09	0,40	7,66	1,10	0,43	6,13	1,19
Ing j-1 / PM	0,19	10,17	1,06	0,20	7,74	1,05	0,42	6,08	1,21
Ing moy 4 jrs / PV	0,41	1,42	1,21	0,54	1,24	1,24	0,43	1,20	1,23
Ing moy 3 jrs / PV	0,38	1,54	1,18	0,42	1,37	1,21	0,47	1,25	1,29
Ing moy 2 jrs / PV	0,29	1,76	1,12	0,30	1,52	1,13	0,42	1,28	1,24
Ing moy 4 jrs / PM	0,43	6,16	1,20	0,55	5,35	1,27	0,44	5,37	1,20
Ing moy 3 jrs / PM	0,38	6,81	1,17	0,40	6,32	1,16	0,48	5,49	1,29
Ing moy 2 jrs / PM	0,27	7,95	1,11	0,34	7,04	1,09	0,43	5,78	1,23

Ingestion mash + paille MOF (VEVI)									
Valeur associée au spectre	Base de données brute			Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing j-4	0,12	1139,11	0,99	0,24	902,48	1,12	0,57	732,22	1,20
Ing j-3	0,11	1208,61	0,98	0,15	966,85	1,06	0,20	926,71	1,09
Ing j-2	0,07	1292,47	0,98	0,15	1027,38	1,07	0,19	914,40	1,08
Ing j-1	0,12	1354,50	1,00	0,20	1048,97	1,09	0,34	945,29	1,12
Ing moy 4jrs	0,16	955,93	0,98	0,65	780,73	1,16	0,28	730,94	1,13
Ing moy 3 jrs	0,15	1046,19	0,98	0,19	910,47	1,09	0,53	854,07	1,14
Ing moy 2 jrs	0,13	1143,58	0,98	0,19	979,83	1,09	0,31	907,41	1,11
Ing j-4 / PV	0,11	2,12	1,04	0,24	1,64	1,10	0,33	1,28	1,12
Ing j-3 / PV	0,20	2,20	1,04	0,13	1,76	1,05	0,24	1,62	1,10
Ing j-2 / PV	0,05	2,39	1,01	0,10	1,86	1,04	0,33	1,48	1,11
Ing j-1 / PV	0,25	2,41	1,07	0,25	1,75	1,10	0,43	1,42	1,17
Ing j-4 / PM	0,12	9,52	1,04	0,26	7,31	1,13	0,38	5,58	1,18
Ing j-3 / PM	0,20	9,97	1,04	0,14	7,94	1,06	0,22	7,33	1,11
Ing j-2 / PM	0,06	10,91	1,01	0,11	8,48	1,05	0,36	6,80	1,11
Ing j-1 / PM	0,14	11,38	1,04	0,27	8,25	1,10	0,37	6,78	1,17
Ing moy 4 jrs / PV	0,14	1,57	1,05	0,58	1,24	1,13	0,25	1,09	1,11
Ing moy 3 jrs / PV	0,28	1,69	1,09	0,14	1,54	1,06	0,29	1,42	1,12
Ing moy 2 jrs / PV	0,29	1,93	1,07	0,20	1,66	1,08	0,40	1,37	1,17
Ing moy 4 jrs / PM	0,21	6,91	1,06	0,61	5,55	1,17	0,32	4,80	1,16
Ing moy 3 jrs / PM	0,29	7,66	1,09	0,16	7,05	1,07	0,39	6,26	1,17
Ing moy 2 jrs / PM	0,15	9,07	1,04	0,25	7,73	1,08	0,39	6,49	1,16

Statistiques de calibration des modèles établis avec la base de données élargie

Valeur associée au spectre	Ingestion mash seul (g de MS)					
	Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing moy 4 jrs / PV	0,90	2,09	2,66	0,91	2,20	2,75
Ing moy 3 jrs / PV	0,90	2,10	2,64	0,90	2,21	2,75
Ing moy 2 jrs / PV	0,89	2,13	2,61	0,90	2,21	2,74
Ing moy 4 jrs / PM	0,88	8,76	2,60	0,90	9,03	2,71
Ing moy 3 jrs / PM	0,88	9,01	2,53	0,89	9,13	2,68
Ing moy 2 jrs / PM	0,88	8,85	2,57	0,89	9,12	2,68

Valeur associée au spectre	Ingestion mash + paille MOF (g de MS)					
	Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing moy 4 jrs / PV	0,90	2,10	2,74	0,91	2,21	2,83
Ing moy 3 jrs / PV	0,89	2,12	2,67	0,91	2,19	2,81
Ing moy 2 jrs / PV	0,89	2,14	2,65	0,91	2,19	2,81
Ing moy 4 jrs / PM	0,89	8,59	2,74	0,90	9,10	2,76
Ing moy 3 jrs / PM	0,89	8,66	2,69	0,90	8,95	2,77
Ing moy 2 jrs / PM	0,89	8,78	2,65	0,90	9,01	2,75

Valeur associée au spectre	Ingestion mash + paille FNIRS (g de MS)					
	Base de données moyenne 2 jours			Base de données moyenne 3 jours		
	RSQ	SECV	RPD	RSQ	SECV	RPD
Ing moy 4 jrs / PV	0,89	2,14	2,69	0,91	2,22	2,82
Ing moy 3 jrs / PV	0,90	2,13	2,67	0,91	2,20	2,80
Ing moy 2 jrs / PV	0,90	2,14	2,65	0,91	2,20	2,80
Ing moy 4 jrs / PM	0,89	8,64	2,73	0,90	9,14	2,75
Ing moy 3 jrs / PM	0,89	8,71	2,68	0,90	8,99	2,76
Ing moy 2 jrs / PM	0,89	8,81	2,64	0,90	9,04	2,75