



HAL
open science

Intérêt de l'intégration de la biodégradabilité de l'amidon et des parois végétales dans l'évaluation des valeurs nutritives de l'ensilage de maïs

Rémi Vial

► **To cite this version:**

Rémi Vial. Intérêt de l'intégration de la biodégradabilité de l'amidon et des parois végétales dans l'évaluation des valeurs nutritives de l'ensilage de maïs. Sciences du Vivant [q-bio]. 2016. dumas-01630071

HAL Id: dumas-01630071

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01630071>

Submitted on 22 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**AGROCAMPUS
OUEST**

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2015-2016

Spécialité :

Productions animales

Spécialisation (et option éventuelle) :

Ingénierie Zootechnie

Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

**Intérêt de l'intégration de la dégradabilité de l'amidon et
des parois végétales dans l'évaluation des valeurs
nutritives de l'ensilage de maïs**

Par : Rémi VIAL

Soutenu à Rennes le 13 septembre 2016

Devant le jury composé de :

Président : Pierre-Guy Marnet

Rapporteur : Lucille Montagne

Maître de stage : Antoine Weinachter

Enseignant référent : Jocelyne Flament

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ :

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ **Vial Rémi** -----

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement(4)
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes du service marketing Evalidis et du service formulation pour leur accueil chaleureux pendant les six mois que j'ai passé à leur côté.

Je voudrais dire merci en particulier à l'équipe ruminant, j'ai apprécié travailler avec eux. Merci de m'avoir convié aux formations techniques, j'y ai beaucoup appris et elles m'ont été utiles pour préciser mon projet professionnel.

J'ai une attention particulière pour mon maître de stage Antoine Weinachter, je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée et l'autonomie qu'il m'a laissée dans l'organisation de mon travail.

Je souhaite remercier également Jocelyne Flament pour le suivi de mon stage.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des sigles

Introduction	1
1. Point contextuel et bibliographique.....	2
1.1. Contexte économique de l'étude	2
1.2. Contexte scientifique	3
1.2.1. Le système Français de rationnement énergétique des vaches laitières.....	3
1.2.2. Le maïs ensilage, un fourrage complexe	4
1.2.3. Incidence zootechnique de la dégradabilité des fourrages	5
1.2.4. Analyse de la dégradation du maïs dans le tractus digestif.....	6
2. Matériels et méthodes.....	8
2.1. Analyses de maïs	8
2.2. Enquête 2015	9
2.3. Traitements des données.....	11
2.3.1. Calcul de ration	11
2.3.2. Analyses statistiques	11
3. Résultats	12
3.1. Données de l'enquête.....	12
3.2. Rôle du dNDF et dAmidon sur la précision de la prédiction	13
3.3. Variables explicatives de l'erreur de prédiction	14
4. Discussion	17
4.1. Fiabilité et précision des mesures de dégradabilité	17
4.2. Limites des données de l'enquête	19
Conclusion et perspectives	20
Références	21

Liste des figures

Figure 1 : Evolution de la collecte Européenne de lait entre 2013 et début 2016. (You, 2016)

Figure 2 : Evolution de la consommation européenne de produits laitiers entre 2013 et 2015. (You, 2016)

Figure 3 : Ecart entre la production laitière estimée par calcul et la production laitière réalisée sur un échantillon d'exploitation en 2012. (Communication interne Néovia)

Figure 4 : Schéma du modèle de prévision de la capacité d'ingestion d'une vache laitière (Faverdin et al., 2006)

Figure 5 : Les différentes étapes de l'utilisation de l'énergie des aliments par les ruminants. (D'après Alimentation des bovins, ovins et caprins, INRA 2007)

Figure 6 : Schéma explicatif NDF, ADF et ADL

Figure 7 : Evolution de l'acidose et ses conséquences (Jouany)

Figure 8 : Schéma récapitulatif de la méthode de mesure de dégradabilité in vitro du maïs. (Communication interne Néovia)

Figure 9 : Prédiction de l'amidon dégradé in vitro à 2h mouture 1.5 mm par SPIR

Figure 10 : Prédiction du NDF dégradé in vitro à 30h mouture 3mm par SPIR

Figure 11 : Prédiction de l'amidon dégradé in vitro à 5h mouture 1.5mm par SPIR

Figure 12 : Prédiction de l'amidon dégradé in vitro à 2h mouture 3mm par SPIR

Figure 13 : Prédiction de l'Amidon dégradé in vitro à 5h mouture 3mm par SPIR

Figure 14 : Répartition géographique des exploitations enquêtées (Guillaume, 2015)

Figure 15 : Schéma des facteurs influençant la production laitière en élevage

Figure 16 : Fenêtre de renseignement des données du troupeau sur ISALIM

Figure 17 : Fenêtre de renseignement de la ration sur ISALIM

Figure 18 : Comparaison des données d'enquêtes aux analyses de l'année 2014

Figure 19 : Graphique de contribution des variables aux deux premières dimensions de l'ACP (UELe)

Figure 20 : Equations de détermination de la dMO du maïs

Figure 21 : Comparaison des prédictions de la production laitière

Figure 22 : Graphique de contribution des variables aux deux premières dimensions de l'ACP (UEL M14 INRA)

Figure 23 : Comparaison de valeurs de digestibilité des fibres in vivo et in vitro

Figure 24 : Dégradabilité de l'amidon et du NDF en fonction de la MS (Analyses 2015 Invivo Labs)

Figure 25 : Teneur en amidon et NDF en fonction de la MS (Analyses 2015 Invivo Labs)

Figure 26 : Comparaison des valeurs TTNDFD aux valeurs obtenues in vivo

Figure 27 : Influence d'individus atypiques sur la corrélation entre le Delta Lait INRA et la dMO M14

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dégradabilités des échantillons de l'enquête.

Tableau 2 : Caractéristiques moyennes des Prim'holstein (Source : Institut de l'élevage, 2015)

Tableau 3 : Caractéristiques principales des tourpeaux de l'enquête.

Tableau 4 : Caractéristiques principales des maïs de l'enquête.

Tableau 5 : Résultat de prédiction de la production laitière avec la méthode Evialis

Tableau 6 : Proportion du NDF et de l'amidon totale de la ration venant du maïs

Tableau 7 : Régression linéaire : Delta-Lait Evialis en fonction du % d'amidon issu du maïs dans la ration.

Tableau 9 : Régression linéaire : résidus modèle Delta-Lait Evialis ~ UELe en fonction de CI

Tableau 10 : Régression linéaire : Delta-Lait Evialis en fonction de l'UELe et de la CI

Tableau 8 : Coefficients de détermination des meilleurs modèles de prédiction du Delta-Lait Evialis

Tableau 11 : Résultat de prédiction de la production laitière avec l'UEL M14

Tableau 12 : Coefficients de détermination des modèles expliquant l'erreur de prédiction

Tableau 13 : Régression linéaire : Delta-Lait INRA en fonction de la dMO M14 et de la CI

Tableau 14 : Comparaison des valeurs de dégradabilité ruminales du NDF de différentes bases de données (Source : Peyrat, 2014).

Tableau 15 : Comparaison des valeurs de dégradabilité ruminales de l'amidon de différentes bases de données (Source : Peyrat, 2014).

Liste des sigles

ACP : Analyse en Composantes Principales

ADF : Acid Detergent Fiber

ADL : Acid Detergent Lignine

AGV : Acides Gras Volatile

CI : Capacité d'Ingestion

dAmidon : Dégradabilité dans le rumen de l'amidon

DCS : Digestibilité Pepsine Cellulase

dNDF : Dégradabilité dans le rumen du NDF

dMO : Digestibilité de la Matière Organique

ESI : Indicateur de structure Evisalis

MAT : Matière Azotée Totale

MS : Matière Sèche

MSI : Matière Sèche Ingérée

NFTA : National Forage Testing Association

NDF : Neutral Detergent Fiber

PDI : Protéine Digestible dans l'Intestin

R² : Coefficient de détermination

R&D : Recherche et Développement

SPIR : Spectrométrie Proche InfraRouge

TB : Taux Butyreux

TP : Taux Protéique

TTNDFD : Total Tract NDF Digestibility

UEL : Unité d'Encombrement Lait

UELe : Unité d'Encombrement Lait Evisalis

UFL : Unité Fourragère Lait

Introduction

Dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle l'agriculture et l'élevage ont connus une véritable révolution. De nouvelles pratiques et techniques ont été adoptées afin d'augmenter la productivité des exploitations agricoles et surtout de répondre aux besoins alimentaires des populations. L'utilisation de maïs fourrage pour nourrir les ruminants fait partie de ces changements majeurs. Il s'est développé en France à partir des années 70 grâce à ses nombreuses qualités (rendement élevé et régulier, apport énergétique...). Il s'est très vite imposé dans les élevages de bovins laitiers (Carpentier et Cabon, 2011). De nos jours (moyenne 2011-2015) le maïs fourrage occupe près de 1,45 million d'ha en France soit environ 10% de la surface dédiée au fourrage (Agreste, 2016).

Le maïs ensilage est un fourrage complexe, constitué d'une partie fibreuse (tige et feuilles) et d'une partie amylacée (épis). Les proportions relatives de ces constituants est variable et dépend de nombreux paramètres (variété, maturité, conditions de cultures et de stockage) (Peyrat, 2014 ; Der Berdrosian et al., 2012). De ce fait, ses apports nutritionnels sont relativement changeants. Etant donné l'importance de ce fourrage en élevage, déterminer sa valeur alimentaire rapidement et à faible coût est un enjeu important de l'alimentation animale. Aujourd'hui encore, des imprécisions persistent dans les mesures de routine notamment lors de campagnes atypiques (Communication interne Néovia).

Les digestibilités dans le rumen des fibres et de l'amidon du maïs ensilage ont des effets zootechniques et alimentaires chez les ruminants. En effet, elles influencent l'ingestibilité, la production laitière et aussi l'activité microbienne du rumen. (Loncke et al., 2011 ; Oba et Allen, 1999 ; Sauvant, 1997).

Evalis, est l'un des leaders de l'alimentation animale en France. L'entreprise se positionne comme un expert de la nutrition qui apporte des solutions techniques et innovantes à ses clients (Evalis, 2016). Dans sa démarche de réponse aux besoins du terrain, Evalis cherche à parfaire la fiabilité de sa méthode de rationnement. La précision du conseil technique est essentielle dans la qualité des services fournis aux éleveurs. C'est dans cette optique qu'un projet de recherche a été conduit afin de répondre à la question suivante :

Les critères de dégradabilité de la fibre et de l'amidon dans le rumen peuvent-ils être intégrés dans le calcul de la valeur énergétique du maïs ensilage afin d'en améliorer la précision ?

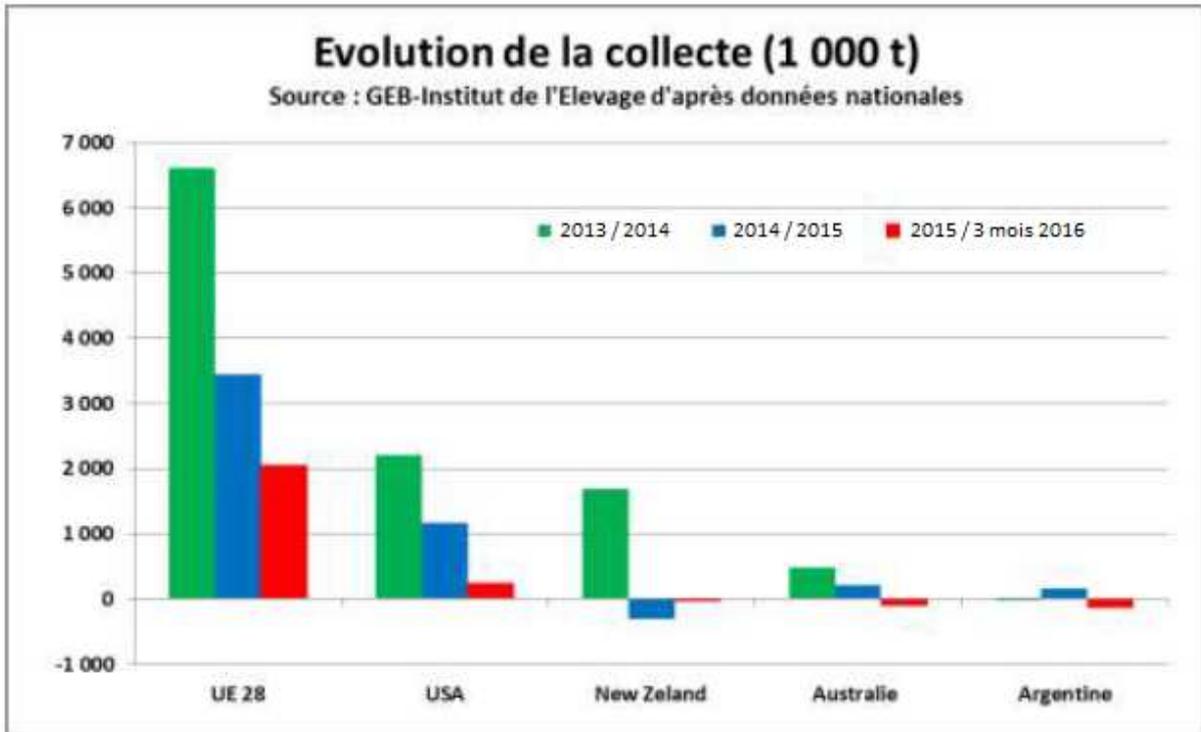


Figure 1 : Evolution de la collecte Européenne de lait entre 2013 et début 2016. (You, 2016)

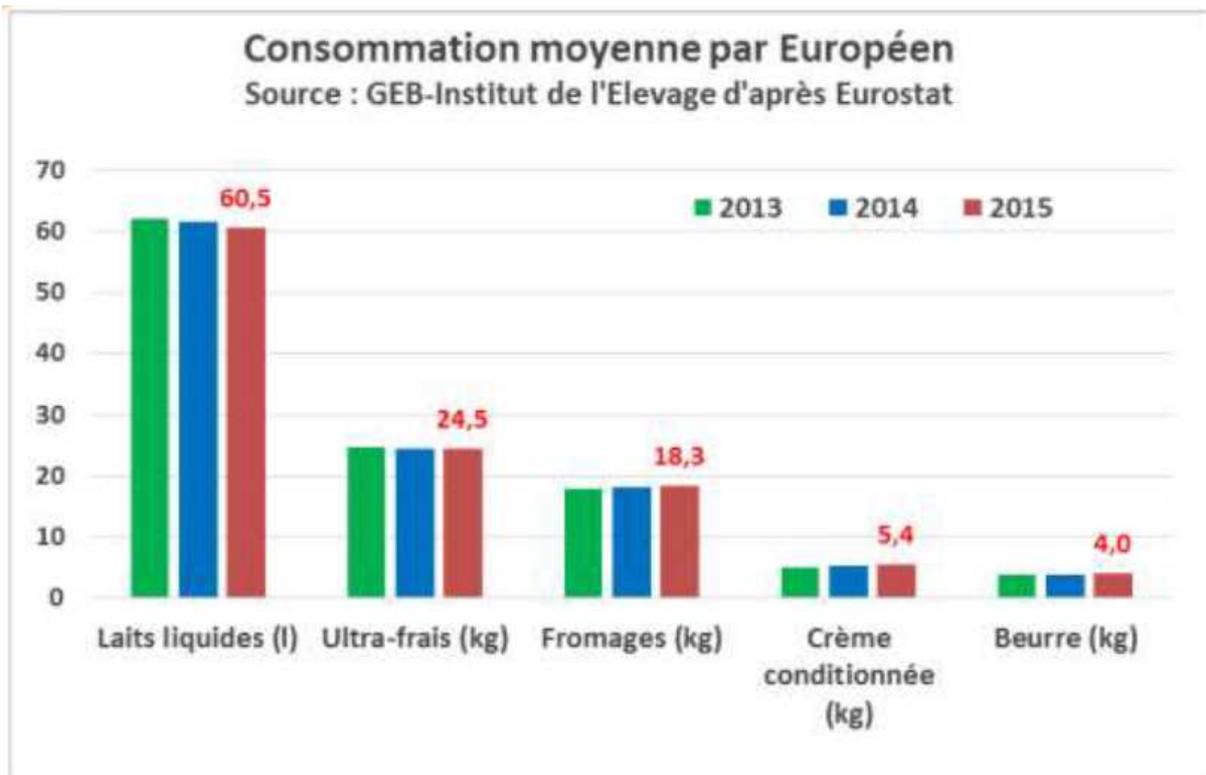


Figure 2 : Evolution de la consommation européenne de produits laitiers entre 2013 et 2015.

(You, 2016)

Avant d'aborder les matériels et méthodes utilisés dans ce projet, il semble essentiel de faire un point sur le contexte économique et scientifique de cette étude. Ensuite, les principaux résultats seront présentés suivis d'une discussion de ces derniers, ce rapport se conclura sur les perspectives envisageables à la suite de ce projet.

1. Point contextuel et bibliographique

1.1. Contexte économique de l'étude

Les exploitations agricoles, comme toute activité économique cherchent à être rentables. La rentabilité d'un élevage dépend de la gestion du ratio entre les charges et les produits. Parmi les charges, l'alimentation des animaux est l'un des postes les plus importants. En effet, en élevage laitier elle représente plus de 30% du coût de production du litre de lait (Cogedis 2015). Au-delà de cet aspect de dépense, l'alimentation a un rôle de premier ordre sur la production, la santé et la capacité de reproduction des animaux. Tous ces éléments font de la nutrition un point clé de la gestion d'un élevage (INRA, 2007).

Le contexte économique actuel de la filière laitière est particulièrement difficile. La fin des quotas laitiers en 2015 a entraîné une hausse significative de la production laitière au niveau européen (figure 1). L'augmentation de la production est particulièrement notable pour les pays fortement exportateurs. Par exemple, l'Irlande et les Pays-Bas ont respectivement augmenté leur collecte de 23% et 14% entre 2012 et 2015. En parallèle, les exportations Européennes augmentent à un rythme moins soutenu que la production. Par exemple, entre 2014 et 2015, les exportations et la production ont progressé respectivement de 1,1 et 3,3 millions de tonnes. La consommation Européenne, elle, reste stable (figure 2). Ce déséquilibre entre l'offre et la demande a entraîné en France une baisse du prix du lait en moyenne de 15% entre 2014 et 2015 (You, 2016). Cela s'associe à un coût de production du lait particulièrement élevé ces dernières années, supérieur à 330 € / 1 000L (Cogedis, 2015). Au vu de ce contexte de compétition à l'échelle internationale, l'optimisation des coûts de production est devenu essentiel pour assurer la pérennité du modèle agricole français.

La société Evalis, membre du groupe Néovia (anciennement Invivo NSA), propose des aliments complets, des produits diététiques et d'hygiène mais aussi un accompagnement technique et économique de ses clients. Après près de 60 ans d'expérience et à travers de grandes marques nationales (Guyomarc'h, Cofna, Purina-DP...), Evalis est devenu un acteur incontournable de l'alimentation animale en France. La stratégie d'Evalis en tant qu'expert de la nutrition animale est d'apporter des solutions performantes et innovantes à ses clients.

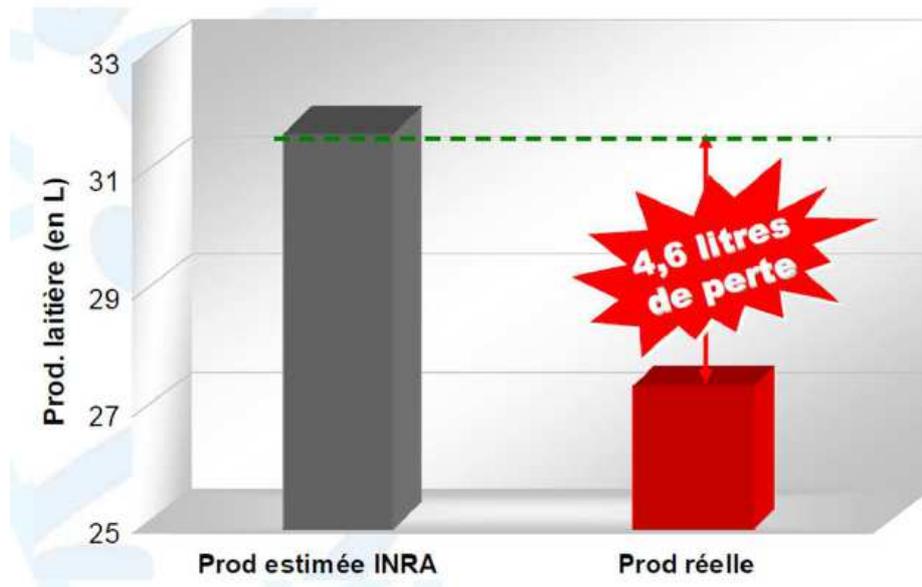


Figure 3 : Ecart entre la production laitière estimée par calcul et la production laitière réalisée sur un échantillon d'exploitation en 2012. (Communication interne Néovia)

Les opérateurs mathématiques indiquent comment ces variables sont prises en compte dans le modèle (effet positif +, négatif -, proportionnel \times).

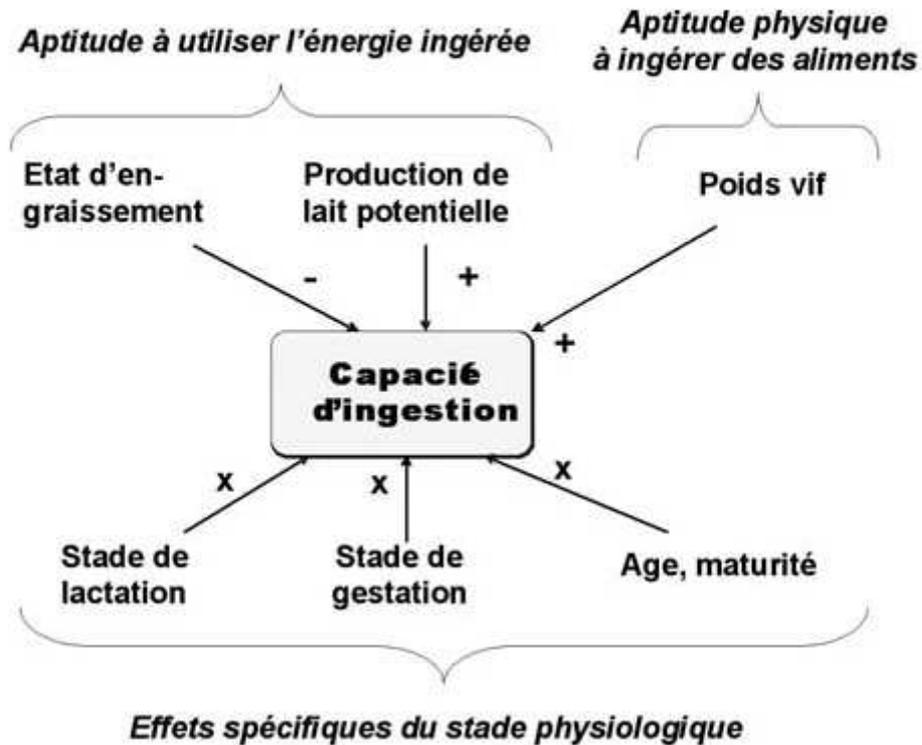


Figure 4 : Schéma du modèle de prévision de la capacité d'ingestion d'une vache laitière (Faverdin et al., 2006)

L'application de cette stratégie passe bien sûr par une Recherche et Développement (R&D) importante étayée par Néovia mais aussi par un service marketing attentif aux besoins du terrain (Evalis, 2016). C'est d'ailleurs des observations faites sur le terrain, notamment en 2012, qui sont à l'origine du projet dont traite ce rapport. En effet, la campagne laitière de 2012 est caractérisée par des résultats de production moyens malgré des maïs fourrages a priori de bonne qualité mais hétérogène dans leur valeurs nutritionnelles. Le système de rationnement d'Evalis basé sur le système INRA ne permet pas d'expliquer ces résultats. Un écart important entre les prédictions calculées et la production laitière réelle est observé (figure 3). Partant de ce constat, la R&D Néovia cherche à mieux caractériser la valeur alimentaire de l'ensilage de maïs. L'objectif à terme est de fournir aux équipes commerciales des outils de rationnement plus précis et plus adaptables aux années particulières. Cela permet aux éleveurs d'atteindre leur objectif d'optimisation de l'alimentation et constitue un avantage concurrentiel pour les services d'Evalis.

Afin de bien comprendre l'intérêt et le contexte scientifique de ce projet il semble important d'aborder quelques éléments de bibliographie. Le principe du rationnement énergétique de la vache laitière et les techniques d'analyse de l'ensilage de maïs sont abordés.

1.2. Contexte scientifique

1.2.1. Le système Français de rationnement énergétique des vaches laitières

Chez les ruminants adultes, la majeure partie de la digestion est réalisée dans les pré-estomacs : feuillet réseau et surtout rumen. Cette digestion est fermentaire, elle dépend de l'action de microorganismes (bactéries, protozoaires et champignons). Les microorganismes du rumen ont la capacité de dégrader de nombreuses molécules (cellulose, hémicellulose, amidon...), c'est ce qui permet aux ruminants de valoriser les fourrages contrairement aux monogastriques. Le pilotage de la nutrition chez les ruminants consiste donc en premier lieu à gérer l'apport des fourrages (Thivend et al., 1985).

Le rationnement consiste à faire correspondre les besoins d'un animal (entretien, production, gestation) et les apports que lui fournit son alimentation. Ces besoins sont apportés selon différents apports sous forme d'énergie, azote, minéraux, oligo-éléments et vitamines (INRA, 2007). Cette synthèse se concentre sur la partie énergétique du rationnement, apport principal de l'ensilage de maïs.

La couverture des besoins énergétiques dépend de deux choses, la quantité de fourrage ingérée et la concentration énergétique du fourrage. La quantité d'aliment ingérée dépend premièrement de l'animal et de sa capacité d'ingestion (CI) (figure 4).

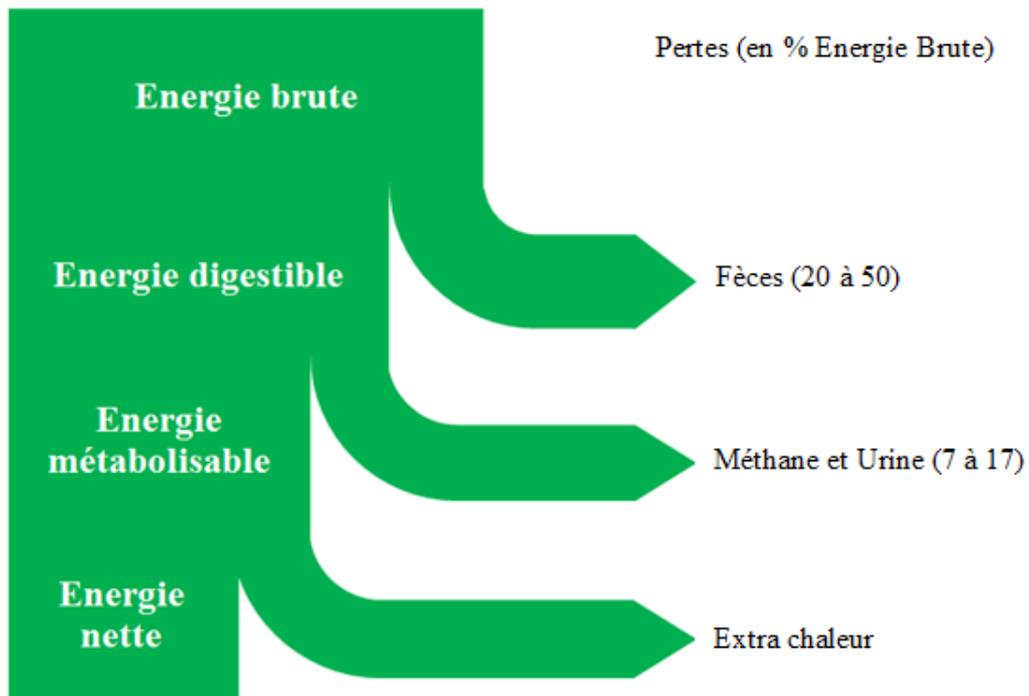


Figure 5 : Les différentes étapes de l'utilisation de l'énergie des aliments par les ruminants.
(D'après Alimentation des bovins, ovins et caprins, INRA 2007)

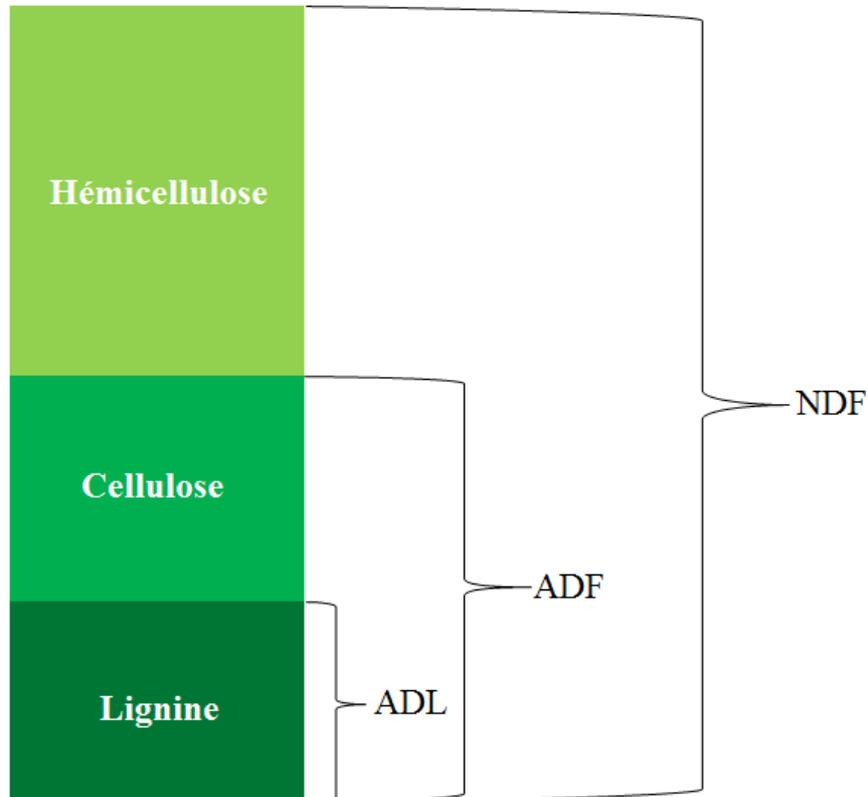


Figure 6 : Schéma explicatif NDF, ADF et ADL

Deuxièmement, elle dépend du fourrage. En effet, en fonction de ses caractéristiques un fourrage est plus au moins encombrant. Un aliment encombrant prend plus de place dans le rumen pour une même quantité de matière sèche (MS).

Pour traiter cette notion, le système INRA utilise l'unité d'encombrement lait (UEL). Une UEL correspond à l'encombrement d'un kg de MS d'une herbe standard pour une vache laitière. Pour la concentration énergétique, le système de l'INRA utilise la notion d'énergie nette (figure 5). Pour les vaches laitières, elle est exprimée en unité fourragère lait (UFL). Cette unité correspond à l'apport en énergie nette pour la production laitière d'un kg d'orge de référence.

Les valeurs UEL et UFL des fourrages sont calculées à partir de plusieurs paramètres. Tout d'abord, elles dépendent de la composition de ces derniers. Elles sont aussi influencées par la capacité des fourrages à être digérée le long du tube digestif. Cette capacité est représentée par la notion de digestibilité de la matière organique (dMO) (INRA 2007). Dans le cas du maïs ensilage la matière organique est composée de différentes fractions qui n'évoluent pas de la même manière dans le tractus digestif.

1.2.2. Le maïs ensilage, un fourrage complexe

Lorsqu'il est récolté sous forme de fourrage, la totalité de la plante de maïs est valorisée. Le maïs est une céréale, il est donc constitué d'une partie fibreuse (la tige et les feuilles) et d'une partie amylacée (les épis).

L'amidon est un polysaccharide composé de chaînes de glucose, il constitue les réserves glucidiques des végétaux. Dans le cas du maïs fourrage il représente en moyenne un tiers de la MS totale selon les analyses de maïs d'Evialis de 2015 (3024 échantillons). Cependant, sa teneur est variable et dépend fortement du stade de maturité du maïs. L'amidon du maïs est principalement contenu dans les épis. Le développement de cette partie de la plante se fait après la fécondation et arrive à la fin du cycle de végétation du maïs. Ainsi, les maïs matures contiennent une part plus importante d'amidon que les immatures (Carpentier et Cabon, 2011).

La tige et les feuilles du maïs sont principalement constituées de glucides structuraux (cellulose et hémicellulose) et de composés phénoliques (lignines et acides phénoliques). Ces constituants pariétaux sont souvent désignés par des termes associés à des techniques de dosage biochimique : Van Soest Neutral Detergent Fiber (NDF) ; Acid Detergent Fiber (ADF) et Acid Detergent Lignine (ADL) (Figure 6). Bien que ces techniques représentent de manière imparfaite la composition des fibres, elles restent très utilisées.

Le NDF, l'ADF et l'ADL représentent respectivement 42% ; 22% et 2.5% de la MS du maïs ensilage selon les analyses d'Evalis en 2015. Ces proportions sont variables en fonction de la maturité de la plante. La teneur en ADL a tendance à augmenter avec la lignification de la plante. La proportion de NDF tend à diminuer par effet de dilution (Peyrat, 2014).

La digestibilité de l'amidon sur l'ensemble du tube digestif est très importante et peu variable. D'après Jensen et al. (2005) elle ne varie qu'entre 98 et 100%, par contre le lieu de sa digestion est plus variable. En effet, chez les ruminants, la majeure partie de l'amidon est dégradé dans le rumen mais une partie atteint les intestins : l'amidon « by-pass ». La digestibilité totale des fibres, elle, est moins importante et plus variable. Elle est en moyenne de 56% et varie de 42 à 76% selon Peyrat, 2014.

1.2.3. Incidence zootechnique de la dégradabilité des fourrages

Comme il a été évoqué précédemment, les vaches se nourrissent principalement de fourrage. L'apport en fibre (NDF) qu'il constitue est nécessaire au bon fonctionnement du rumen. En effet, les fourrages stimulent la motricité du tube digestif, favorisent la rumination, et la salivation, ce qui est essentiel dans la gestion du pH ruminal. Le contrôle de l'acidité de cet organe est très important. En effet, le pH oriente le développement de la flore microbienne et peut entraîner s'il est mal géré des maladies métaboliques comme l'acidose et l'alcalose. Une ration équilibrée pour les ruminants nécessite donc une certaine fibrosité (Oba et Allen, 1999). En contrepartie de leurs bienfaits sur la digestion, les fourrages prennent une place importante dans le rumen. Leur caractère fibreux les rend particulièrement encombrant, ils ont donc tendance à limiter l'ingestion.

Chez les animaux à fort potentiel, les besoins en énergie sont conséquents. Dans ce cas, les fourrages consommés doivent non-seulement favoriser le bon fonctionnement du rumen mais aussi apporter une part importante d'énergie. La dégradabilité des fibres est primordiale pour répondre à ces exigences. En effet, elle caractérise tout d'abord la part de NDF dégradée dans le rumen, mais aussi la vitesse à laquelle les fibres sont fermentées et disparaissent du rumen. La dégradabilité du NDF est donc d'un critère dont l'impact est non négligeable sur la valeur énergétique des fourrages mais aussi sur leur encombrement.

La couverture des besoins nutritionnels est souvent évaluée en élevage laitier par la production de lait. Elle constitue à travers sa quantité et sa qualité un indicateur essentiel pour le pilotage du troupeau (Coulon et Remond, 1991). Dans leurs travaux Oba et Allen (1999) et Ivan et al. (2005) ont observé l'influence de la digestibilité de la fibre sur la production laitière.

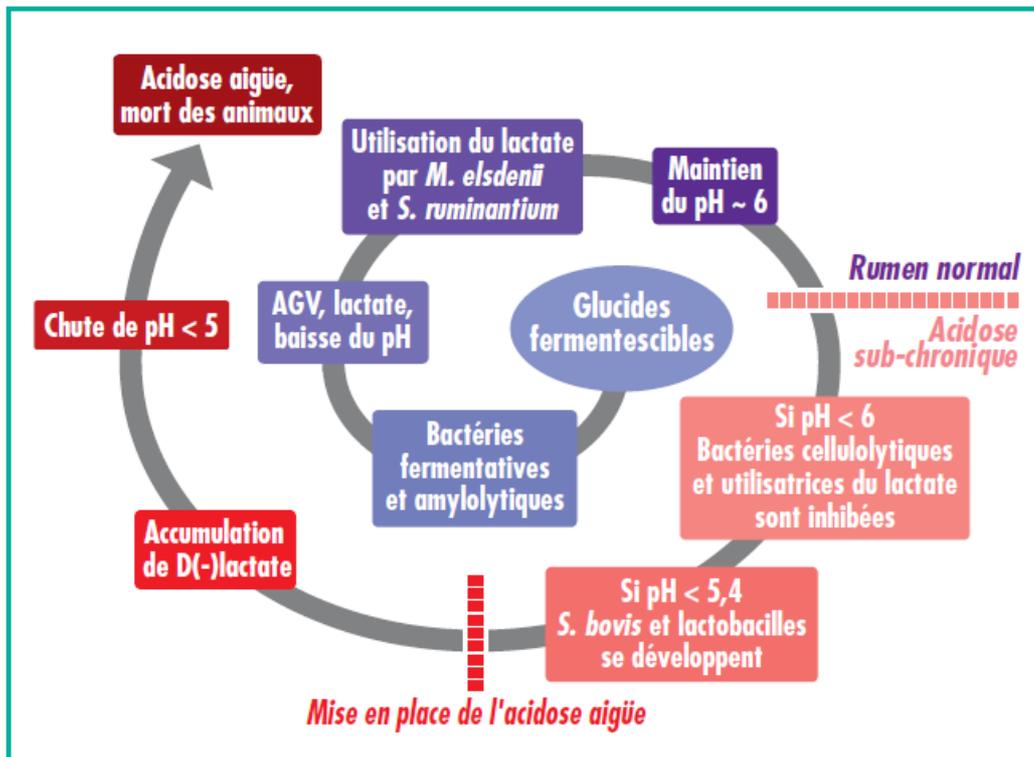


Figure 7 : Evolution de l'acidose et ses conséquences (Jouany)

Ils ont mis en évidence qu'une digestibilité plus élevée du NDF du maïs entraîne chez les vaches une ingestion de matière sèche plus importante associée à une augmentation de la production laitière.

La dégradabilité de l'amidon a également des impacts zootechniques importants. Dans sa synthèse bibliographique, Sauvant (1997) recense les nombreux effets de la vitesse de digestion de l'amidon dans le rumen. Il souligne notamment que la dégradabilité de l'amidon a une incidence sur la quantité de matière organique fermentescible dans le rumen. Cela correspond aux ressources disponibles pour le développement des microbes. La digestion de ces microorganismes par les ruminants constitue un apport majeur dans les Protéines Digestible dans l'Intestin (PDI). La dégradabilité influence donc indirectement la protéosynthèse microbienne. Elle a un rôle important dans la partition de la digestion le long du tube digestif. Il est également noté qu'une forte digestibilité de l'amidon dans le rumen augmente la concentration énergétique du fourrage. Ainsi, une forte dégradabilité de l'amidon est un atout pour bien valoriser la ration et apporter beaucoup d'énergie aux animaux.

Une forte proportion d'amidon rapidement dégradable dans la ration des ruminants peut avoir des conséquences négatives comme l'acidose. Il s'agit d'une maladie métabolique qui est due à l'accumulation d'acides dans le rumen issus de la fermentation rapide de glucides. Les acides gras volatiles (AGV) produits par les microorganismes excèdent la capacité de neutralisation du rumen (production de salive). A long terme, elle peut conduire à une perturbation de l'homéostasie en tarissant les réserves alcalines. L'acidose conduit à un dysfonctionnement du rumen et impacte la production et les taux, elle peut même entraîner la mort des animaux (Jouany). La Figure 7 illustre l'évolution de l'acidose.

Au vu des conséquences importantes de la dégradabilité des fibres et de l'amidon de nombreuses techniques de mesures ont été mises au point pour mieux les caractériser.

1.2.4. Analyse de la dégradation du maïs dans le tractus digestif

De nombreuses techniques sont aujourd'hui disponibles pour qualifier la dégradabilité des fourrages. Les principes des méthodes les plus utilisées sont expliqués dans cette partie.

La méthode *in vivo* est la technique de référence. Elle permet d'évaluer la digestibilité d'un aliment sur l'ensemble du tractus digestif. Elle consiste à comparer les compositions des aliments et des fèces. Cela permet de déterminer quelles proportions des composants des aliments ont disparus lors de la digestion. L'application de cette méthode est particulièrement laborieuse et coûteuse. Pour pallier ces défauts, d'autres techniques ont été développées.

La méthode *in sacco* ou *in situ* est très utilisée dans l'alimentation des ruminants. Cette technique consiste à introduire le fourrage à analyser dans des sachets en nylon ou dacron. Leur porosité permet le passage de microorganismes mais empêche les pertes de fourrages. Ces sachets sont placés dans le rumen des polygastriques à travers une canule. Cette dernière est posée par chirurgie, elle permet un accès direct au rumen depuis le flanc gauche de l'animal. Après un temps d'incubation défini, les sachets sont retirés du rumen et analysés. Les différences de composition avant et après incubation des sachets permettent de déterminer la digestibilité ruminale. La méthode *in sacco* est assez proche des conditions *in vivo* mais elle reste exigeante en main d'œuvre. Le nombre d'analyse est limité par la disponibilité d'animaux possédant une canule (Berthiaume et al., 2015).

Une autre méthode, assez proche dans son fonctionnement, est souvent utilisée : la mesure *in vitro*. Cette technique permet de s'affranchir partiellement des animaux qui servent uniquement de donneur de contenu ruminal. Les sachets contenant le fourrage sont ici incubés dans des flacons qui visent à mimer le rumen. Pour ce faire, on y introduit du liquide ruminal, des solutions tampons (salive artificielle) et ils sont maintenus à température corporelle dans un bain-marie. Après incubation, le contenu des sachets est analysé pour évaluer la dégradabilité. L'avantage de cette technique est qu'elle permet de faire des mesures sur un grand nombre d'échantillons simultanément (Berthiaume et al., 2015).

Afin de s'affranchir totalement des animaux pour les mesures de digestibilité, des méthodes chimiques et enzymatiques ont été créées. Elles consistent à reproduire *in vitro* les digestions que subissent les fourrages *in vivo* via l'action d'enzymes spécifiques et de traitements chimiques. La digestibilité pepsine cellulase (DCS) est l'une des plus utilisée. Elle sert d'ailleurs aux calculs des valeurs UE et UF du maïs ensilage via la dMO et l'équation M4 dans le système de l'INRA (Aufrère et al., 2007).

La Spectrométrie Proche Infra-Rouge (SPIR) est également une technique d'analyse des fourrages. Elle se répand de plus en plus du fait de sa rapidité et son faible coût d'exécution. Cette technique s'appuie sur les propriétés physiques des molécules organiques à absorber le spectre lumineux dans le proche infrarouge. Les mesures réalisées ne fournissent pas directement des informations sur la composition des fourrages. Elles permettent cependant de comparer les spectres d'absorption des échantillons à mesurer à une gamme de spectre qui correspondent à des fourrages dont la composition est connue. Cette technique nécessite donc une calibration préalable qui peut être faite à l'aide des méthodes décrites précédemment. La gamme de calibration utilisée doit être la plus importante possible afin de représenter aux mieux la variabilité des fourrages (Peyrat, 2014).

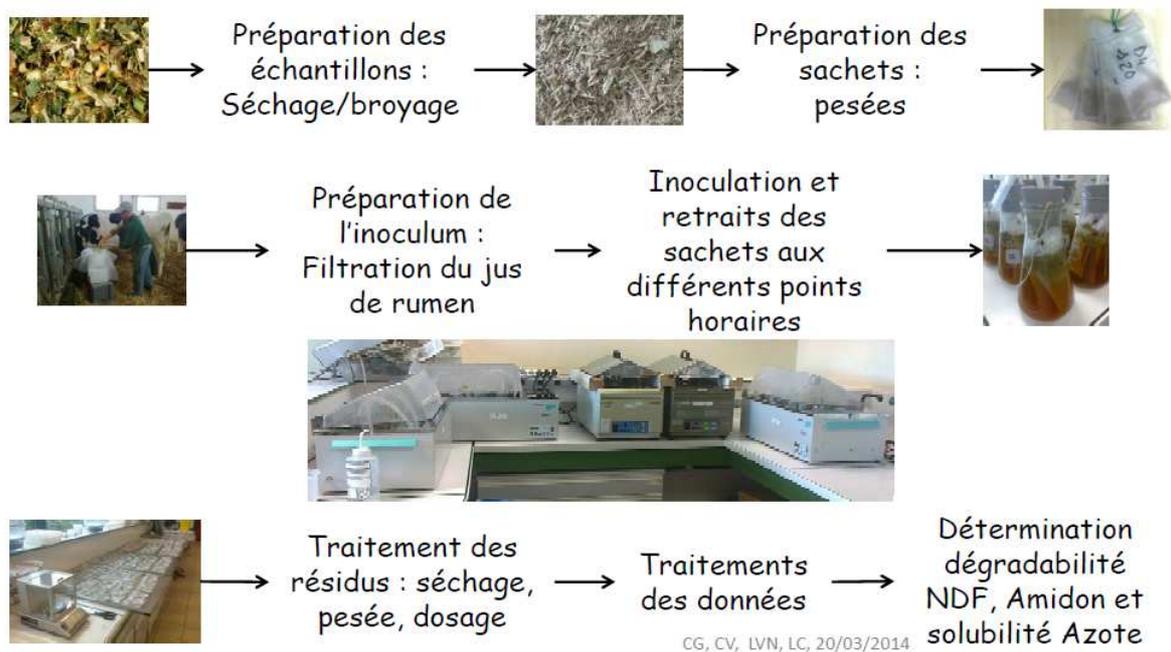


Figure 8 : Schéma récapitulatif de la méthode de mesure de dégradabilité in vitro du maïs.
 (Communication interne Néovia)

2. Matériels et méthodes

2.1. Analyses de maïs

L'analyse des fourrages fait partie des services que propose Evialis aux éleveurs. Elles sont réalisées par les laboratoires Invivo Labs filiale de Néovia. Les bulletins d'analyses fournis aux éleveurs contiennent les valeurs alimentaires traditionnelles mais également des indicateurs spécifiques développés par Evialis. Par exemple, les valeurs d'encombrement des fourrages sont fournies en « UELe », unité spécifique de l'entreprise. Les analyses de routine sont faite par SPIR, cette technique a été choisie pour ces nombreux avantages (rapide, peu coûteuse et non destructive). Dans une logique de continuité et de praticité la R&D a souhaité mesurer la digestibilité du maïs via cette technique.

Comme il l'a été dit précédemment, les mesures SPIR nécessitent une calibration préalable. Afin de mesurer un grand nombre d'échantillons nécessaires à la constitution de la base de données servant aux SPIR à un coût maîtrisé, la méthode in vitro pour la dégradabilité de l'amidon et des fibres du maïs a été préférée. La calibration de la machine s'est déroulée en plusieurs étapes. Des premières mesures ont été réalisées en 2014 sur plus de 100 échantillons de maïs provenant de la France entière afin d'être le plus représentatif possible. De nouvelles mesures complémentaires ont été faites en 2015 sur une nouvelle gamme de trente maïs. Ces nouvelles mesures permettent d'améliorer la précision de la calibration et de prendre en compte la variabilité des maïs entre différentes récoltes.

Chaque maïs subit plusieurs mesures avec des modalités différentes :

- Dégradabilité du NDF, incubation de 30h, mouture à 3mm et 3 répétitions ;
- Dégradabilité de l'amidon, incubation de 2h et 5h, mouture 1,5mm et 3mm et 3 répétitions pour chaque modalité.

Les durées d'incubation et les diamètres de mouture ont été établis à partir de recherches bibliographiques et de méthodes internes. Comme il n'existe pas de protocole de référence, plusieurs modalités de mesures ont été conduites pour l'amidon afin de déterminer la plus pertinente. La figure 8 représente un schéma récapitulatif de la méthode de mesure utilisée. Le protocole de la méthode de référence est précisé en Annexe I.

En parallèle à ces mesures in vitro, des prises de spectre dans le proche infrarouge ont été réalisées avec la machine FOSS NIRS 5000. Ensuite à l'aide de logiciel de calibration associé à la machine, des analyses statistiques sont réalisées. Ces analyses permettent de mettre en relation les liens entre les dégradabilités mesurées in vitro et les données analytiques des spectres.

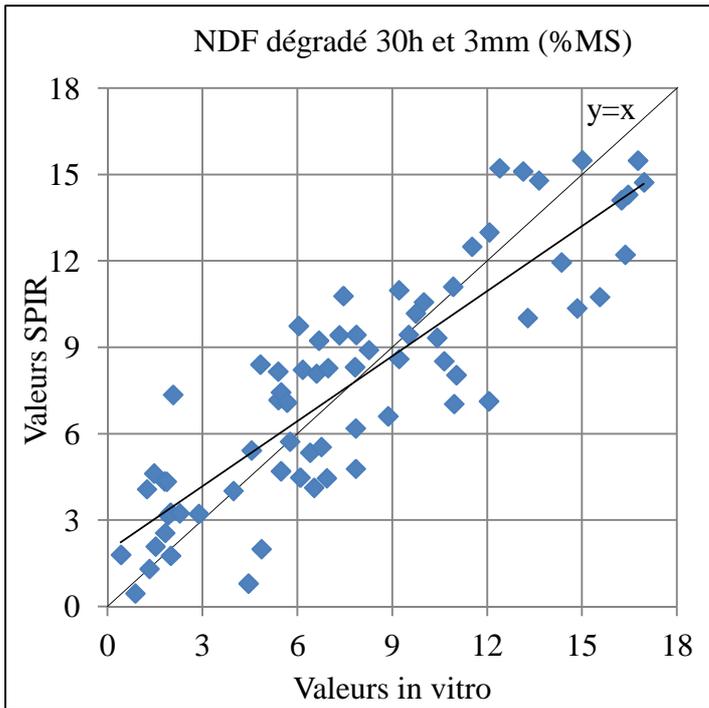


Figure 10 : Prédiction du NDF dégradé in vitro à 30h mouture 3mm par SPIR
 $R^2 = 0,63$ $SECV = 3,22$

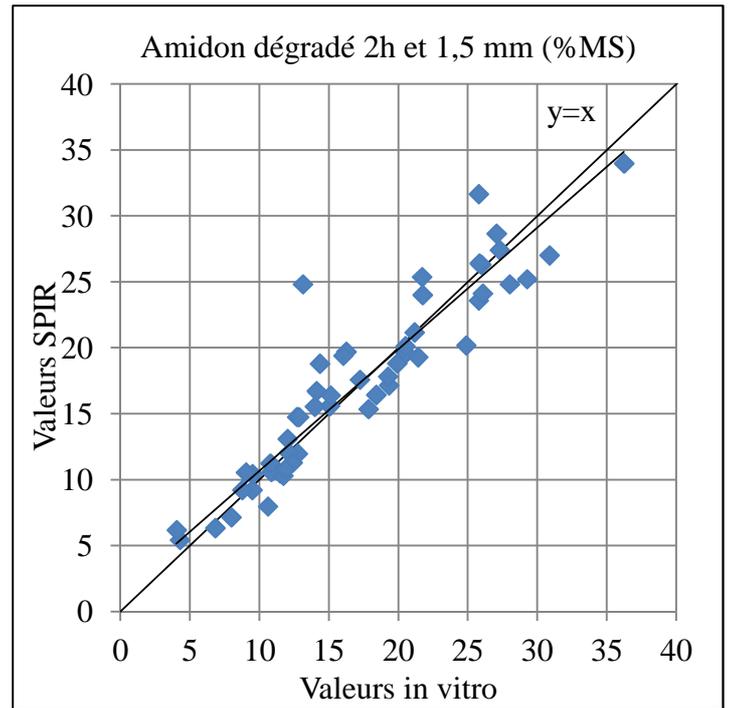


Figure 9 : Prédiction de l'amidon dégradé in vitro à 2h mouture 1,5 mm par SPIR
 $R^2 = 0,95$ $SECV = 2,95$

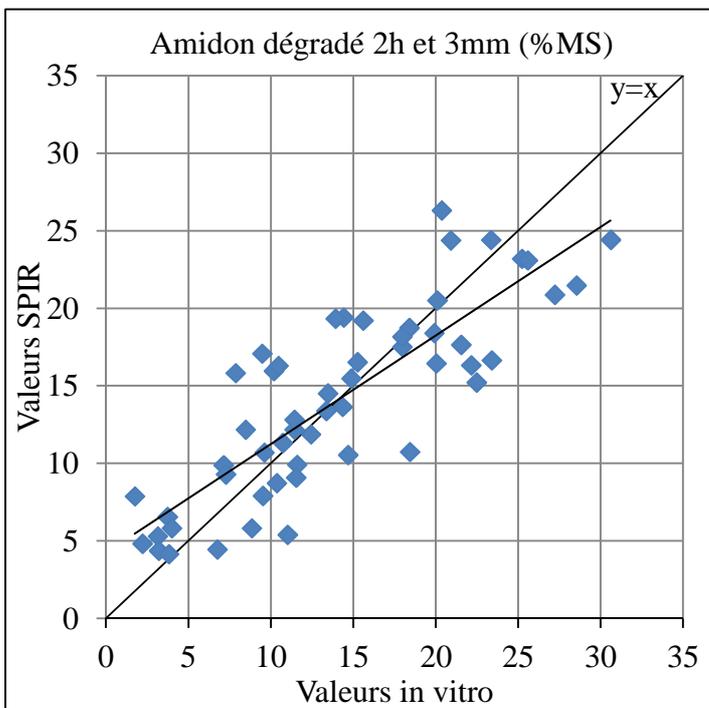


Figure 12 : Prédiction de l'amidon dégradé in vitro à 2h mouture 3mm par SPIR
 $R^2 = 0,78$ $SECV = 4,16$

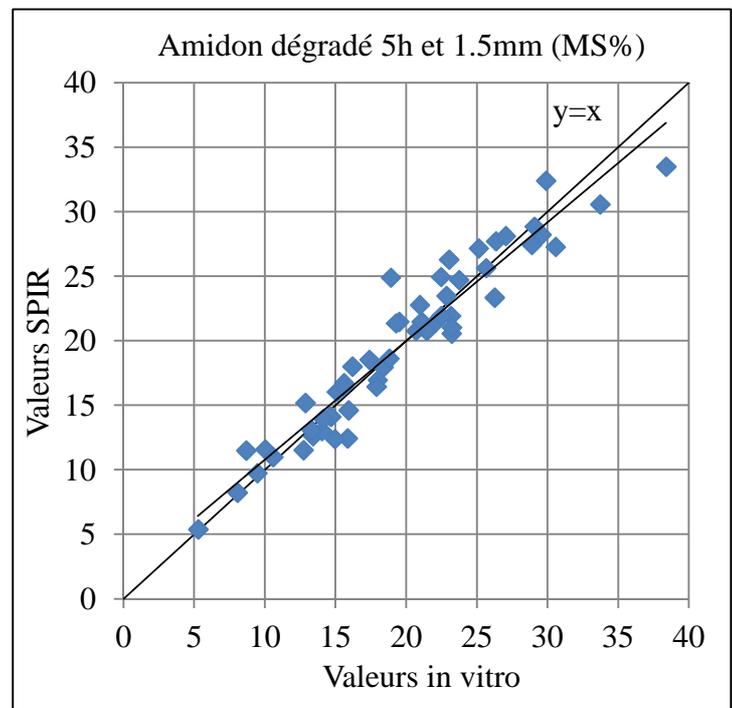


Figure 11 : Prédiction de l'amidon dégradé in vitro à 5h mouture 1,5mm par SPIR
 $R^2 = 0,84$ $SECV = 3,49$

Les analyses réalisées n'ont pas révélé de correspondance suffisante entre les données analytiques des spectres et les dégradabilités in vitro pour réaliser une calibration. Cependant, les quantités de NDF dégradé (en % MS) et d'amidon dégradé (en %MS) ont donné de meilleures correspondances. Ainsi, une calibration a pu être réalisée. Elle permet d'estimer les valeurs de NDF dégradé in vitro et d'amidon dégradé in vitro à partir des spectres d'absorptions. Les valeurs de dégradabilités peuvent ensuite être retrouvées par calculs selon les formules suivantes :

$$- \text{dNDF} = \text{NDF dégradé (\%MS)} / \text{NDF totale (\%MS)}$$

$$- \text{dAmidon} = \text{Amidon dégradé (\%MS)} / \text{Amidon total (\%MS)}$$

Les graphiques (figures 9, 10, 11, 12 et 13 page suivante) comparent les valeurs obtenues par spectrométrie à celle obtenues in vitro sur les mêmes échantillons. Les données concernent les calibrations initiales réalisées en 2014. La qualité des prédictions est évaluée par le coefficient de détermination (R^2) et la Standard Error Cross Validation (SECV). La SECV est l'écart type qui définit la précision du modèle. Plus cette valeur est proche de zéro, plus le modèle est précis. La qualité de la prédiction du NDF dégradé est moyenne, sur une gamme de calibration allant d'environ 0 à 18% l'écart-type de prédiction est supérieur à 3%. Les prédictions de l'amidon dégradé semblent globalement meilleure notamment pour la modalité 2h et mouture fine. Le R^2 est bon (0,95) et la SECV est inférieur à 3%.

Une fois les calibrations réalisées, les mesures de dégradabilité ont pu être conduites en routine sur les maïs des clients Evalis. Les résultats obtenus ne sont pour l'instant pas fournis dans les bulletins d'analyses. En effet, il y a pour l'instant peu de recul sur ces valeurs brutes et elles ne sont pas facilement exploitables par les techniciens et les éleveurs sous cette forme.

2.2. Enquête 2015

Afin de valoriser sur le terrain les mesures de dégradabilité, l'élaboration d'un indice ou l'ajustement de valeurs alimentaires a été envisagé dans un premier temps. Le stage de fin d'études réalisé par Simon GUILLAUME au sein du service marketing d'Evalis entre février et aout 2015 s'inscrit dans cette optique. La problématique de son travail était la suivante : «
Pouvons-nous inclure le critère dNDF dans le calcul de la valeur énergétique et la valeur d'encombrement de l'ensilage de maïs afin d'en améliorer la précision ? » (Guillaume, 2015).

Simon Guillaume et ses encadrants ont choisi d'observer l'influence alimentaire du dNDF via la production de lait. Pour ce faire, une enquête auprès d'éleveurs laitiers clients d'Evalis a été réalisée. Cette enquête cherchait tout d'abord à recenser les différents éléments liés à la production laitière dans ces exploitations, pour ensuite isoler le rôle du dNDF sur les valeurs alimentaires du maïs.

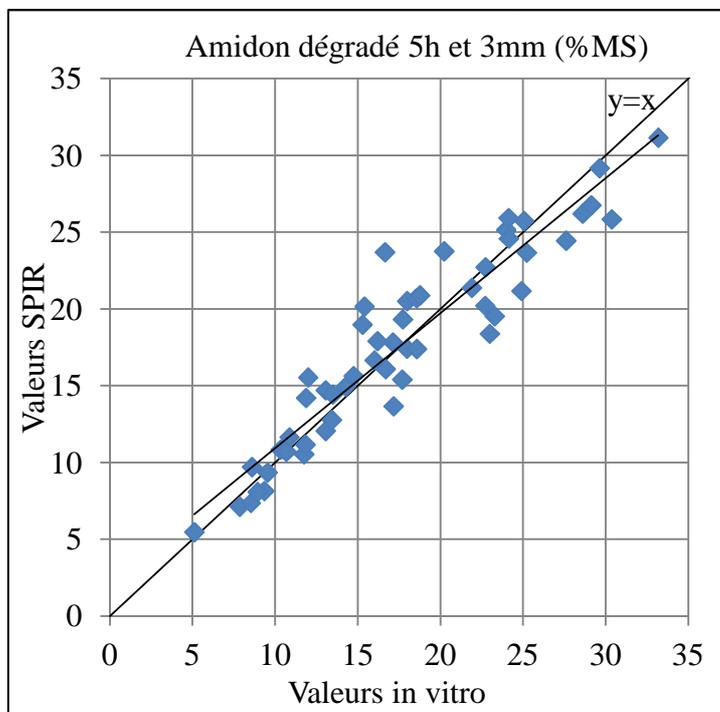


Figure 13 : Prédiction de l'Amidon dégradé in vitro à 5h mouture 3mm par SPIR
 $R^2 = 0,83$ $SECV = 3,63$



Figure 14 : Répartition géographique des exploitations enquêtées (Guillaume, 2015)

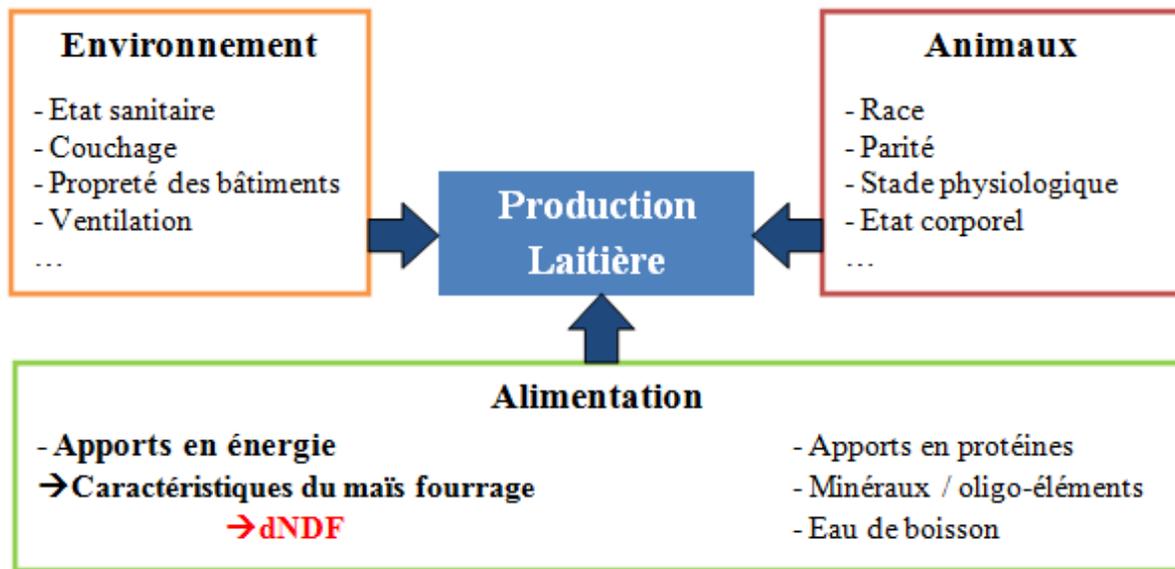


Figure 15 : Schéma des facteurs influençant la production laitière en élevage

Tableau 1 : Dégradabilités des échantillons de l'enquête.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-Type
dAmidon 2h 3mm	-8,03	-18,60	12,60	6,72
dAmidon 5h 3mm	8,06	-3,70	19,10	5,91
dAmidon 2h 1,5mm	20,51	10,70	30,80	4,32
dAmidon 5h 1,5mm	27,86	18,30	34,60	3,51

La figure 15, illustre les principaux items abordés durant l'enquête. Dans le questionnaire, l'accent a été mis sur les données nécessaires pour déterminer avec précision les besoins des animaux (lait produit, taux, format...) mais également sur les apports fournis par la ration (Annexe II). Les informations récoltées devaient permettre de réaliser de manière précise des estimations de production. L'ensilage de maïs a été systématiquement analysé, suite à une prise d'échantillon rigoureuse lors de l'enquête. Les analyses des autres fourrages utilisés étaient également collectées dans la mesure du possible ainsi que les valeurs nutritionnelles des aliments de marque concurrentes.

La liste des élevages à enquêter a été définie selon les critères suivant :

- Ration principalement composée d'ensilage de maïs sur la période d'enquête (Mars à Mai) ;
- Possibilité de peser la quantité de ration distribuée ;
- Adhérents au contrôle laitier ou ayant un robot (mesure de production et des taux) ;
- Elevage ne présentant pas de problème majeur (problème sanitaire, ensilage mal conservé).

Cinquante exploitations répondant à ces critères ont été retenues. Elles sont réparties sur toute la France pour respecter la diversité des élevages du pays comme l'atteste la carte figure 14.

Plusieurs exploitations enquêtées ont dû être écartées à cause d'informations manquantes ou de situations particulières susceptibles d'entraîner un biais (impossibilité de peser la ration ; limitation de la production volontaire...). Finalement, 43 exploitations sont retenues.

De la même manière que pour le dNDF, les valeurs de dAmidon ont été mesurées sur les maïs de l'enquête (tableau 1). Les valeurs négatives pour les modalités mouture de 3mm soulignent des problèmes de calibration. Ces valeurs ne sont donc pas exploitables. Cependant, les mesures réalisées avec une mouture de 1.5mm donnent des résultats plus cohérents.

Les résultats trouvés sur le rôle du dNDF étant prometteurs, le service marketing a souhaité poursuivre ce projet via un autre stage de fin d'études. Cette suite du projet consistait notamment à valoriser les données de dégradabilité de l'amidon. Confirmer les résultats trouvés sur le dNDF et trouver d'autres pistes (solubilité de la Matière Azotée Totale (MAT)) étaient également envisagées dans le sujet. Ainsi, ce stage a principalement porté sur des traitements et analyses de données. Les outils et méthodes utilisés sont décrits dans la partie suivante.

Tableau 2 : Caractéristiques moyennes des Prim'holstein (Source : Institut de l'élevage, 2015)

	Poids (kg)	Age au vêlage moyen (mois)
Primipares	680	46
Multipares	630	30
Troupeaux	660	39

Animal

Race Lait

Primipare Multipare

Lactation Tarie

Production lait (Kg / jour) Poids (Kg)

TB (g / Kg) TP (g / Kg)

Pic de lactation potentiel

Activité Fécondation à jours

Vêlage

Age au vêlage (mois) Note d'état

Poids du veau

Lactation

Semaine de lactation Note d'état

Figure 16 : Fenêtre de renseignement des données du troupeau sur ISALIM

Libellé	QtéMS	QtéMB	MS	àVol	Prop.	UELe	UFL	MAT	PDIN	PDIE
2007 Foin Plaine (Normandie) 10/06, épiais	0,76	0,89	85	<input checked="" type="checkbox"/>	0,8	1,11	0,72	104	65	77
ENRUBANNAGE RGA Qualité Moyenne	0,67	1,12	60	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1,17	0,75	130	68	66
Ensilage Mais GAEC	13,95	44,7	31,2	<input checked="" type="checkbox"/>	40	1,00	0,92	74	45	68
PAILLE de Blé	0,49	0,56	88	<input checked="" type="checkbox"/>	0,5	1,60	0,42	35	22	44
POMME DE TERRE	0,36	1,79	20	<input checked="" type="checkbox"/>	1,6	0,60	1,20	108	63	103
AZOLIS EXCEL	1,13	1,3	87	<input type="checkbox"/>			0,95	390	315	260
AZOLIS TEMPO	1,57	1,8	87	<input type="checkbox"/>			0,88	440	320	190
ENERLIS ART	2	2,3	87	<input type="checkbox"/>			0,90	160	105	100
LIKIS 30	0,39	0,6	65	<input type="checkbox"/>			0,65	300	195	45
PRIM' OSVIOR 9-20-5	0,3	0,3	100	<input type="checkbox"/>						
Total	21,6	55,4	39			18,42	19,80	3 101	2 100	2 047
Concentration						0,85	0,92	143	97	95
Lait Permis							28,8		32	31
Couverture						100 %	97 %		105 %	103 %
Besoins						18,46	20,33		1 995	1 995

Figure 17 : Fenêtre de renseignement de la ration sur ISALIM

2.3. Traitements des données

2.3.1. Calcul de ration

Les équipes Evialis utilisent le logiciel ISALIM version 3.0 de 2011 pour le calcul de ration. C'est donc à l'aide de ce logiciel basé sur le moteur de calcul de l'INRA que les rations des élevages enquêtés ont été reproduites. Les indicateurs spécifiques d'Evialis sont intégrés au logiciel, ils permettent ainsi aux techniciens d'ajuster leurs conseils. Seule l'UELe entraîne une différence avec le calcul de l'INRA.

Une méthode de calcul homogène a été retenue, elle s'adapte aux informations disponibles après enquête. Les rations ont été faites pour une vache moyenne dont les caractéristiques (production, taux, stade de lactation...) correspondent aux valeurs moyennes du troupeau. L'ingestion de cet animal a été fixée au maximum de sa valeur théorique. Pour certaines informations non fournies par l'enquête (âge au vêlage, poids moyen) des valeurs moyennes issues du contrôle laitier et d'informations internes ont été retenues (tableau 2).

Afin de prendre en compte l'effet de la parité, deux calculs ont été faits par troupeau, un pour les primipares et un autre pour les multipares. Le poids et l'âge au vêlage des animaux étaient modifiés en fonction de la parité. Une moyenne pondérée des résultats était ensuite réalisée en fonction de la proportion de primipares et de multipares dans le troupeau. Dans le cas où cette proportion n'était pas renseignée, une seule ration était réalisée avec des valeurs moyennes.

L'établissement des rations se conduit de la manière suivante :

- Renseignement des caractéristiques du troupeau (figure 16)
- Renseignement du contenu de la ration (figure 17)

A partir de ces informations, le logiciel calcule le lait permis par les UFL et les PDI. Au niveau de cette enquête, les PDI ne sont pas limitant pour la production. Le lait réellement produit est donc comparé au lait permis par les UFL. De plus, on s'intéresse ici principalement à la dimension énergétique du maïs.

2.3.2. Analyses statistiques

Afin de déterminer le rôle des différentes variables disponibles sur la production laitière, des analyses statistiques sont nécessaires. Les logiciels SPSS version 20 et R version 3.1.2 ont été utilisés pour ces analyses. Différents types d'analyses ont été réalisées :

- Régressions linéaires : pour créer des modèles expliquant la variabilité d'une variable quantitative Y par des variables quantitatives explicatives $X_1 X_2 \dots X_n$, le seuil de significativité est fixé à 5%.

Tableau 3 : Caractéristiques principales des tourpeaux de l'enquête.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Nombre VL	29	150	74,47	30,32
Lait/VL/j	23	36	29,00	3,40
TB moyen	37	44	39,85	1,91
TP moyen	30,5	35,0	32,25	0,96
MS-Maïs/MSI	40,8%	72,7%	57,5%	7,1%

Tableau 4 : Caractéristiques principales des maïs de l'enquête.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
MS	24,58	42,14	34,41	4,24
UFL	0,88	0,99	0,94	0,02
UEL EVIALIS	0,75	1,15	0,95	0,08
AMIDON	26,4	45,7	34,35	3,77
NDF	32,8	47,0	39,01	3,59

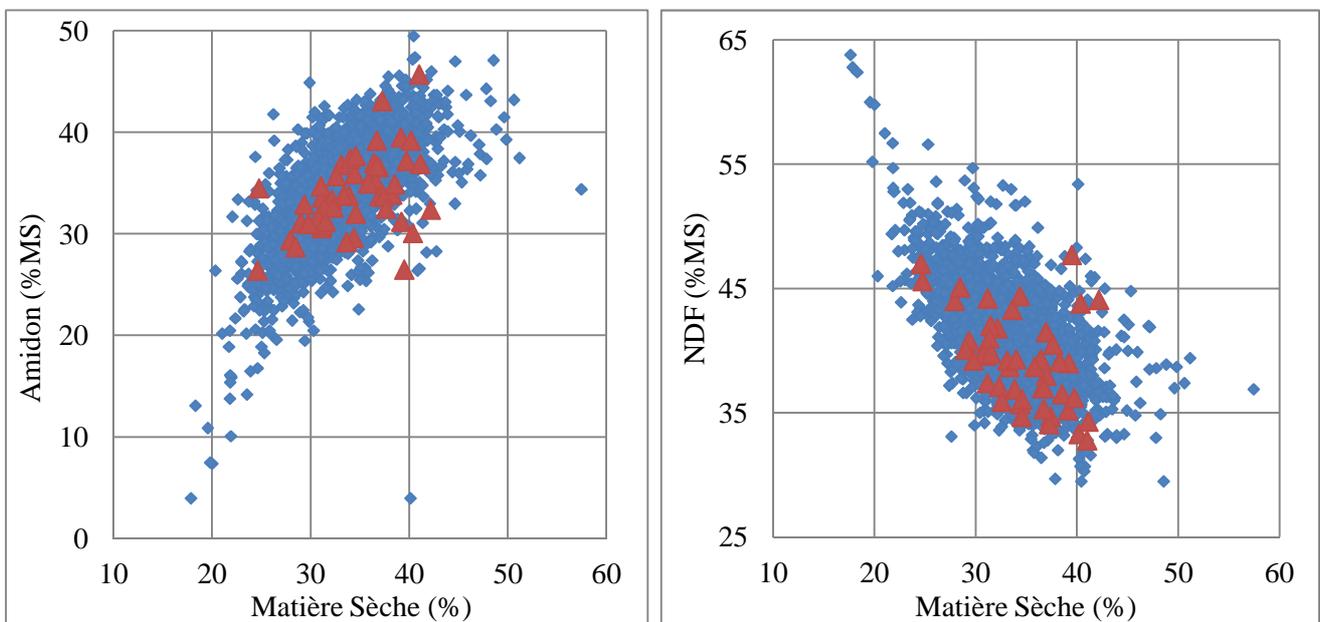


Figure 18 : Comparaison des données d'enquêtes ▲ aux analyses de l'année 2014 ◆

- Corrélations de Pearson : pour qualifier l'évolution d'une variable quantitative par rapport à une autre variable quantitative, le seuil de significativité est fixé à 1% ;
- Analyse en Composantes Principales : pour créer des dimensions synthétisant l'information de plusieurs variables et observer l'évolution de variables quantitatives par rapport aux dimensions créées ;
- Analyse des résidus d'un modèle linéaire : pour évaluer quelle variable est susceptible d'apporter une information supplémentaire au modèle. Les résidus représentent la variabilité qui n'est pas expliquée par le modèle. L'influence d'une variable sur les résidus est déterminée via une régression linéaire. Le seuil de significativité est également de 5%.

3. Résultats

Avant d'aborder l'influence des dégradabilités mesurées sur les prédictions de production, il semble important de présenter les caractéristiques majeures des élevages de l'enquête et des maïs récoltés.

3.1. Données de l'enquête

Les animaux des 43 exploitations conservées sont tous de race Prim'holstein. La taille des exploitations est variable avec des troupeaux de moins de 30 vaches à plus de 150. Le niveau de production est important avec en moyenne 29L de lait produit par jour et par vache avec un taux butyreux (TB) moyen de 39,8 g/L et un taux protéique (TP) moyen de 32,2 g/L. Les rations sont donc adaptées aux fortes productions avec une proportion importante de maïs fourrage. En effet, il représente en moyenne 58% de la Matière Sèche Ingérée (MSI). Le tableau 3 résume les principales caractéristiques des troupeaux.

L'année 2014 a été particulièrement favorable à la culture du maïs, les rendements ont même atteint des records cette année (AGPM, 2014). Malgré ces bonnes conditions, la qualité des maïs de l'enquête est variable comme en atteste le tableau 4. Cela s'explique par le fait que les échantillons viennent de toute la France et connaissent donc des conditions de cultures différentes. De plus, les pratiques de culture, de récolte et de stockage varient d'un élevage à un autre. Par exemple, la maturité à la récolte reflétée par le taux de MS à une gamme de variation de 17,5%. Cela impacte fortement les caractéristiques du maïs notamment les teneurs en NDF et amidon (tableau 4).

L'enquête répond bien à l'exigence fixée sur la forte proportion de maïs dans la ration. Il est également souhaitable que les caractéristiques des ensilages de l'enquête soient représentatifs des ensilages Français. Les graphiques de la figure 18 comparent les analyses de maïs de l'enquête à toutes celles réalisées pour les clients d'Evalis la même année.

Tableau 5 : Résultat de prédiction de la production laitière avec la méthode Evalis

Delta-Lait Evalis	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
	-0,79	-7,90	4,67	2,58

Tableau 6 : Proportion du NDF et de l'amidon totale de la ration venant du maïs

	Moyenne	Minimum	Maximum
Proportion du NDF issu du maïs dans la ration	59%	42,5%	81,5%
Proportion de l'amidon issu du maïs dans la ration	83,7%	54,1%	100%

Tableau 7 : Régression linéaire : Delta-Lait Evalis en fonction du % d'amidon issu du maïs dans la ration.

Variable dépendante: Delta-Lait-Evalis

Source	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	38,552 ^a	1	38,552	6,570	0,014
Ordonnée à l'origine	30,439	1	30,439	5,188	0,028
% Amidon issu du Maïs	38,552	1	38,552	6,570	0,014
Erreur	240,576	41	5,868		
Total	306,223	43			
Total corrigé	279,128	42			

a. R deux = 0,138 (R deux ajusté = 0,117)

Ces graphiques montrent que les données d'enquête ne présentent pas de valeurs atypiques par rapport aux données de l'année. De plus, malgré la taille modeste de l'enquête, une part importante de la variabilité des maïs est couverte. Ces éléments faciliteront la généralisation des observations faites sur ces données à l'ensemble des maïs.

3.2. Rôle du dNDF et dAmidon sur la précision de la prédiction

A partir des données d'enquête et de la méthode de calcul décrite précédemment, les rations des élevages ont été reproduites. La production laitière permise par les UFL selon le logiciel de rationnement est comparée à la production moyenne des troupeaux réellement constatée dans les exploitations. Pour les analyses, une variable « Delta-Lait Evialis » a été calculée selon la formule suivante :

$$\text{Delta-Lait Evialis} = \text{Lait Réel (observé)} - \text{Lait permis par les UFL (calculé)}.$$

Le tableau 5, présente les résultats associés à ce calcul. L'erreur de prédiction moyenne est inférieure à un litre ce qui est satisfaisant. Cependant, l'écart-type est important. Pour une exploitation l'écart entre la prédiction et la réalité a même atteint 7,9 litres. Ces résultats confirment le problème qui est à l'origine de ce projet : La prédiction de la production s'éloigne fortement de la réalité dans certaines conditions.

Les élevages de l'enquête ont été sélectionnés notamment pour leur forte utilisation de maïs dans la ration. Cependant, la proportion du NDF et d'amidon venant de l'ensilage de maïs est variable. Le tableau 6, montre les gammes de variations de ces proportions et leur valeur moyenne. Bien que le maïs représente souvent plus de la moitié de l'apport en NDF de la ration, cette proportion diminue lorsque d'autres fourrages sont utilisés. L'amidon des rations est majoritairement apporté par le maïs. Cependant, dans les exploitations qui utilisent d'autres céréales et des concentrés de production le poids du maïs dans l'apport en amidon est plus faible.

Des régressions linéaires ont été faites pour déterminer quelles variables permettent d'expliquer la variabilité du delta-lait. Dans un premier temps, il paraît intéressant d'observer l'influence du poids du maïs dans les apports en NDF et amidon sur le Delta-Lait. La proportion de NDF apportée par le maïs n'a pas d'influence significative sur le Delta-Lait. Au contraire, les résultats sont significatifs pour la proportion d'amidon. Le résultat de la régression linéaire est disponible dans le tableau 7. Cependant, la proportion d'amidon venant du maïs a une influence limitée sur le Delta-Lait, elle n'explique que 13.8% de sa variabilité.

Les hypothèses selon lesquelles les dégradabilités in vitro du NDF et de l'amidon de l'ensilage de maïs ont une influence sur l'erreur de prédiction ont été vérifiées.

Tableau 8 : Coefficients de détermination des meilleures modèles de prédiction du Delta-Lait Evialis

Variabes	R ²	Variabes	R ²
UELe Maïs	0.411	NDF Maïs (%MS)	0.367
UFL Maïs	0.411	ESI	0.367
Cellulose Maïs (%MS)	0.396	dMO Maïs (%MS)	0.360
Amidon Maïs (%MS)	0.382	DCS (%MS)	0.360
ADF Maïs (%MS)	0.380	ADL Maïs (%MS)	0.213

Tableau 9 : Régression linéaire : résidus modèle Delta-Lait Evialis ~ UELe en fonction de CI

Variable dépendante: Résidu standardisé pour DeltaLaitEvialis					
Source	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	8,239 ^a	1	8,239	10,311	0,003
Ordonnée à l'origine	8,234	1	8,234	10,304	0,003
CI	8,239	1	8,239	10,311	0,003
Erreur	32,761	41	0,799		
Total	41,000	43			

a. R deux = 0,201 (R deux ajusté = 0,181)

Tableau 10 : Régression linéaire : Delta-Lait Evialis en fonction de l'UELe et de la CI

Variable dépendante: Delta-Lait-Evialis					
Source	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	147,812 ^a	2	73,906	22,512	0,000
Ordonnée à l'origine	75,861	1	75,861	23,108	0,000
CI	33,049	1	33,049	10,067	0,003
UELEVIALIS	117,790	1	117,790	35,880	0,000
Erreur	131,316	40	3,283		
Total	306,223	43			

a. R deux = 0,530 (R deux ajusté = 0,506)

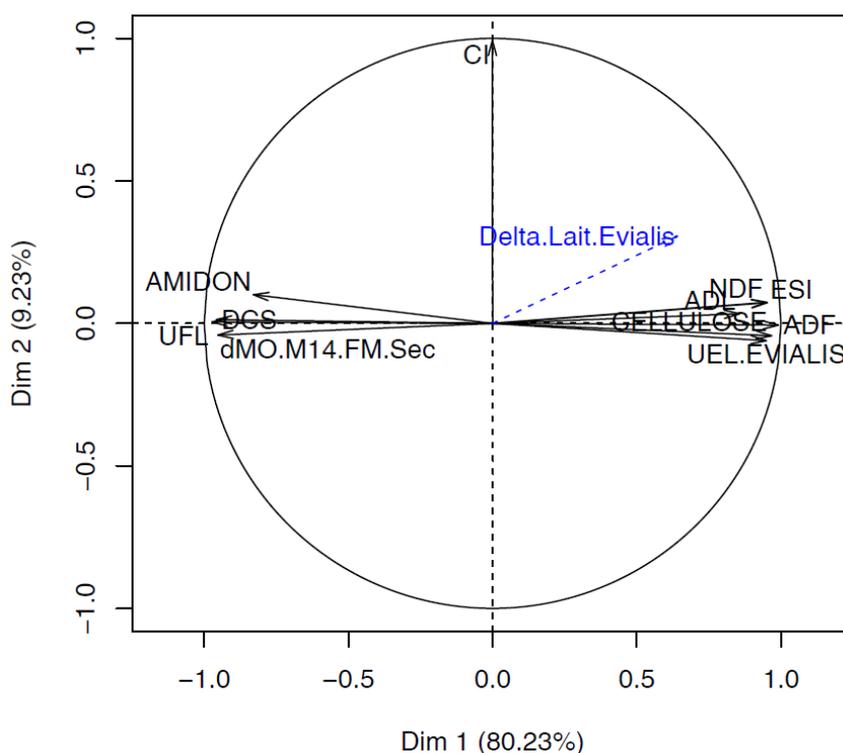


Figure 19 : Graphique de contribution des variables aux deux premières dimensions de l'ACP (UELe)

Trois régressions linéaires ont été réalisées. Le Delta-Lait était la variable à expliquer. La dégradabilité du NDF à 30H, la dégradabilité de l'amidon à 2h mouture 1,5mm et la dégradabilité de l'amidon à 5h mouture 1,5mm ont servi de variables explicatives. Aucun des trois modèles n'a fourni de résultat significatif. D'après ces analyses, on peut conclure que les valeurs de dégradabilité mesurées in vitro n'ont pas d'influence significative sur la variabilité de l'erreur de prédiction.

3.3. Variables explicatives de l'erreur de prédiction

Il est intéressant d'évaluer le rôle d'autres variables sur la variabilité du Delta-Lait. C'est avec cet objectif que nombreuses régressions linéaires ont été faites. Le tableau 8, fournit les coefficients de détermination (R^2) des variables les plus significatives. Ce sont les valeurs nutritionnelles du maïs ensilage qui ont le plus d'impact sur le Delta-Lait Evalis avec en premier lieu l'UELe.

Le meilleur modèle (UELe) n'explique que 41% de la variabilité du Delta-Lait Evalis. Il reste donc 59% de la variabilité qui n'est pas expliquée ce qui correspond aux résidus du modèle. Une variable qui explique la variabilité des résidus peut apporter une information supplémentaire au modèle. Seule la CI a une influence significative sur les résidus Cf. tableau 9. L'ajout de la CI comme variable explicative au modèle initial l'améliore. La nouvelle régression permet d'expliquer 53% de la variabilité de l'erreur de prédiction (tableau 10).

Le graphique d'ACP de la figure 19 permet d'observer comment évoluent ces variables les unes par rapport aux autres et comment elles sont liées au Delta-Lait Evalis. Le plan principal représenté dans ce graphique couvre 89,46% de la variabilité des variables qui composent l'ACP. Ici, la première dimension est construite par les caractéristiques du maïs. Deux groupes de variables s'opposent sur cet axe : les variables liées à la composition en fibre du maïs (NDF, Cellulose...) et les variables liées à sa teneur énergétique (UFL, Amidon...). Le positionnement d'un maïs sur cet axe fournit une information synthétique sur sa composition. La deuxième dimension est orthogonale à la première, elle est principalement construite par la CI. Il n'y a pas de corrélation entre les deux dimensions. La CI dépend des caractéristiques des animaux et donc n'est pas impactée par les valeurs du maïs. Le Delta-Lait Evalis est dans cette ACP une variable illustrative, elle n'a pas participé à la construction des dimensions. Sa projection sur le plan souligne le fait que sa variabilité est expliquée à la fois par les caractéristiques du maïs (projection sur la dimension 1 : 0,64 et \cos^2 : 0,41) et par la capacité d'ingestion (projection sur la dimension 2 : 31% et \cos^2 0,094).

$M1 \text{ dMO} = 79,4 + 0,0652MATo - 0,0591CBo$	MO : Matière Organique
$M4 \text{ dMO} = 28,5 + 0,0732MATo + 0,5501DCS$	MATo : Matière Azotées Totale (%MO)
$M14 \text{ dMO} = (\text{dMO M1} + \text{dMO M4}) / 2$	CBo : Cellulose Brute (%MO)

Figure 20 : Equations de détermination de la dMO du maïs

Tableau 11 : Résultat de prédiction de la production laitière avec l'UEL M14

Delta-Lait M14	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
	-0,63	-3,2	3,7	1,86

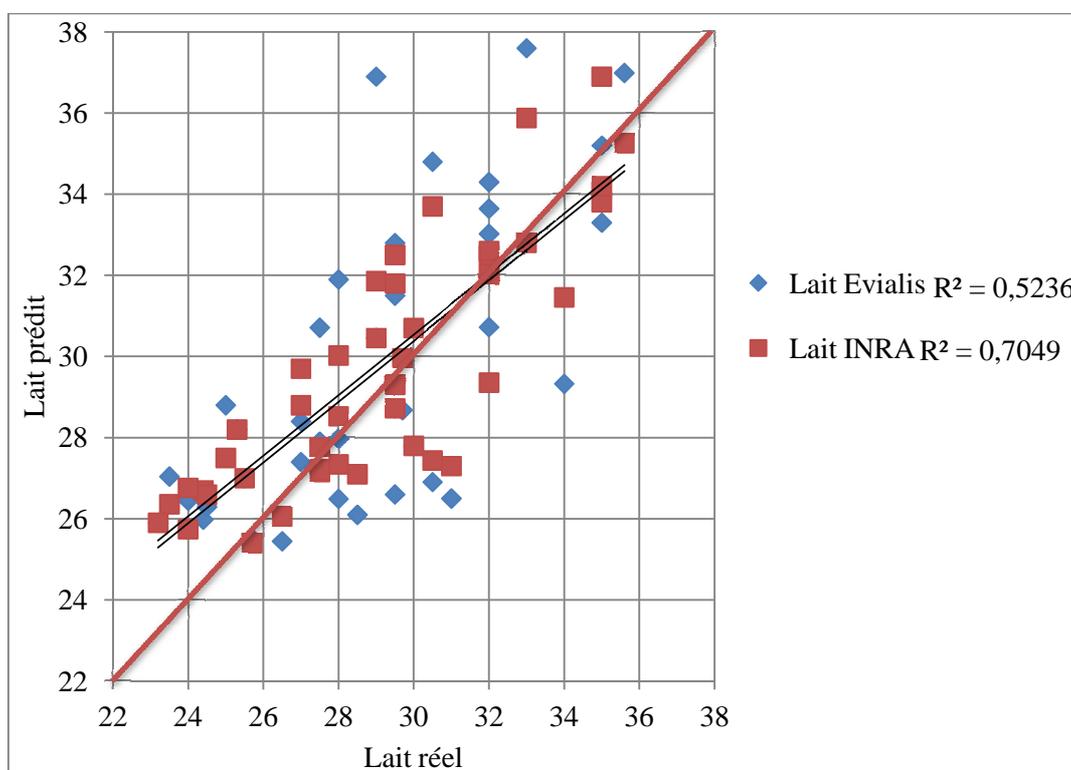


Figure 21 : Comparaison des prédictions de la production laitière

Tableau 12 : Coefficients de détermination des modèles expliquant l'erreur de prédiction

Variabes	R ²	Variabes	R ²
dMO M14	0,304	ESI	0,246
UFL	0,302	ADF Maïs (%MS)	0,239
DCS Maïs (%MS)	0,302	CI	0,234
NDF Maïs (%MS)	0,274	UEL M14	0,207

L'UELe a un rôle important dans l'erreur de prédiction de la production laitière. De plus, elle est bien représentée sur la dimension 1 de l'ACP, elle reflète donc différentes caractéristiques du maïs. Elle est calculée en fonction de la teneur en amidon, en cellulose et en matière minérale du maïs selon la formule suivante :

$$UELe = 14,3 / (8,45 + 1,45 * ((35,38 - (100 / (100 - MM - A) * C)) / 8,43)) * (100 / (100 - MM - A))$$

MM : Matière Minérale (%MS) ; A : Amidon (%MS) ; C : Cellulose (%MS)

Partant de ces observations, il a été jugé intéressant d'utiliser les valeurs d'UEL de l'INRA pour réaliser les prédictions de production. L'UEL est calculée en fonction de la dMO selon la formule suivante : $UEL = 140 / (-76,4 + 2,39dMO + 1,44MS)$.

Plusieurs équations sont disponibles pour calculer la dMO du maïs, celle qui est fournie dans les bulletins d'analyses est nommée « dMO M14 », elle correspond à la moyenne des modèles M1 et M4 développés par l'INRA. Les équations sont rappelées dans la figure 20.

Les valeurs UEL ont été calculées à partir de la dMO M14 fournie dans les analyses, le terme « d'UEL M14 » sera utilisé pour les désigner. Les prédictions de production ont été calculées avec ces valeurs d'encombrement suivant la même méthode que celle utilisée auparavant. Les résultats obtenus sont décrits dans le tableau 12. Bien que seule la valeur de l'UEL change dans le calcul, les résultats obtenus sont assez différents. L'erreur de prédiction moyenne est égale à -0,63L, la gamme d'erreur est plus faible, elle varie de -3,2L à 3,7L, ainsi l'écart-type est également réduit (1,86). Ainsi, l'utilisation de l'UEL M14 dans les calculs semble fournir de meilleurs résultats de prédiction pour les exploitations enquêtées.

Afin de vérifier cette hypothèse les prédictions sont comparées graphiquement. La figure 21 fournit en ordonné la quantité de lait prédit par les deux méthodes de calcul. En abscisse, se trouve les quantités de lait réellement produit. Les droites de régression des deux méthodes de prédiction sont très similaires du fait de la proximité des calculs utilisés. Malgré la ressemblance des nuages de points, celui associé à la méthode Evialis est plus dispersé. L'utilisation de l'UEL M14 permet une prédiction plus précise avec un coefficient de détermination de 0,705 contre 0,524 avec l'UELe.

De la même manière que pour les premiers calculs, il est intéressant de connaître quelles variables expliquent l'écart de prédiction. Le tableau 12, fournit les coefficients de détermination des variables les plus explicatives. Les valeurs alimentaires du maïs ont toujours un poids important dans l'erreur de prédiction notamment celles liées à la teneur énergétique. Il est important de noter que l'UEL M14 semble engendrer moins d'erreur dans la prédiction que l'UELe. En effet, elle explique ici que 20% de la variabilité du Delta-Lait.

Tableau 13 : Régression linéaire : Delta-Lait INRA en fonction de la dMO M14 et de la CI

Variable dépendante: Delta Lait INRA					
Source	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	76,518 ^a	2	38,259	22,159	0,000
Ordonnée à l'origine	3,415	1	3,415	1,978	0,167
CI	32,219	1	32,219	18,660	0,000
dMO M14	42,391	1	42,391	24,552	0,000
Erreur	69,064	40	1,727		
Total	162,796	43			
Total corrigé	145,582	42			

a. R deux = 0,526 (R deux ajusté = 0,502)

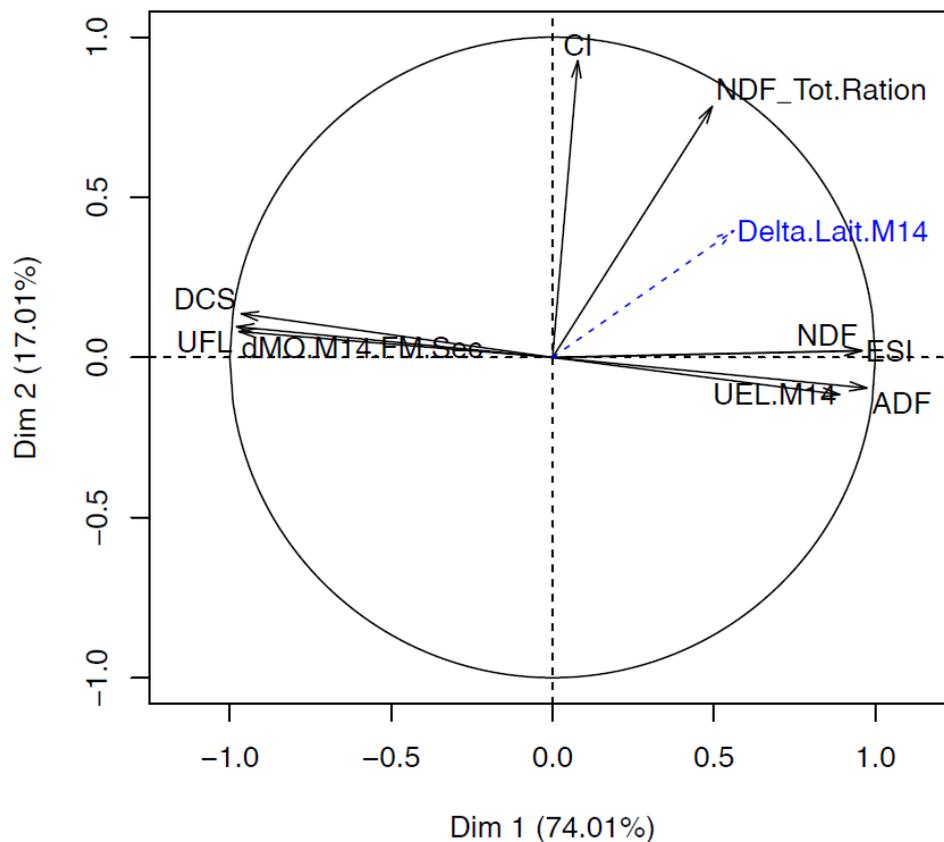


Figure 22 : Graphique de contribution des variables aux deux premières dimensions de l'ACP (Uel M14 INRA)

La teneur en amidon n'est plus significative, avec ces données. Cela peut s'expliquer par les différences de calcul des deux UEL. En effet, l'UEL Evialis est calculée à partir de la teneur en amidon, ces deux variables sont donc fortement corrélées (-0,95). La corrélation de l'amidon et de l'UEL M14 est plus faible (-0,64). Comme précédemment, les différentes dégradabilités in vitro n'ont pas d'effet notable.

L'analyse des résidus des modèles a permis d'établir le modèle expliquant le mieux la variabilité du Delta-Lait M14. Il est présenté dans le tableau 13. L'écart de prédiction est ici expliqué par la dMO et la CI. Le modèle explique 52,6% de la variabilité du Delta-Lait M14.

Le graphique d'ACP, figure 22, permet de visualiser ces différents résultats. Le plan principal couvre 91% de la variabilité des variables utilisées pour construire cette ACP. De la même manière qu'avec les calculs précédents, la première dimension est construite par les caractéristiques des ensilages de maïs. La deuxième dimension, elle, dépend de la CI des animaux. La variable « NDF total ration » est bien représentée sur les deux dimensions. Elle dépend à la fois de la CI mais aussi de l'apport en NDF du maïs. Le Delta-Lait M14 dépend également des deux dimensions. Cependant, sa représentation sur le graphique est moins bonne, une part de sa variabilité n'est pas expliquée par les variables prises en compte.

Avant de tirer des conclusions sur les résultats présentés dans cette partie il est essentiel d'étudier les limites et les biais rencontrés lors de ce projet.

Tableau 14 : Comparaison des valeurs de dégradabilité ruminales du NDF de différentes bases de données (Source : Peyrat, 2014).

dNDF(%)	Observations	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
ARVALIM®					
In sacco	166	32.5	4.8	19.2	43.8
INRA					
In sacco	15	25.0	10.0	11.2	20.1
Analyse Neovia 2015					
In vitro 30h 3mm	3024	16.3	6.2	0	30.4

Tableau 15 : Comparaison des valeurs de dégradabilité ruminales de l'amidon de différentes bases de données (Source : Peyrat, 2014).

dAmidon(%)	Observations	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
ARVALIM®					
In sacco	165	90.2	5.7	69.8	99.7
INRA					
In sacco	25	93.0	4.7	76.3	97.1
Invivo Labs 2015					
In vitro 2h 1.5mm	3003	52.7	14.1	7.1	100
In vitro 2h 3mm	3021	46.4	13.7	0	100
In vitro 5h 1.5mm	3000	68.1	10.0	28.3	99.6
In vitro 5h 3mm	3019	52.7	12.1	0	95.0

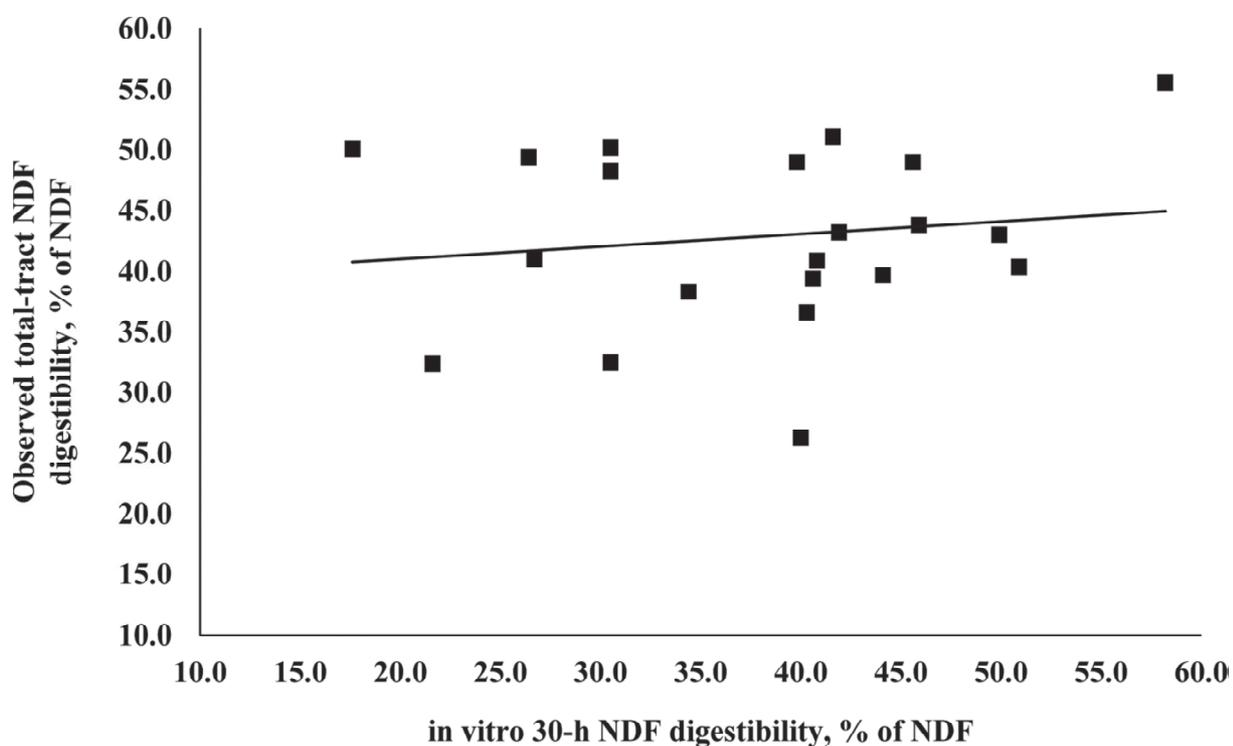


Figure 23 : Comparaison de valeurs de digestibilité des fibres in vivo et in vitro (Source : Lopes et al., 2015)

4. Discussion

Les résultats obtenus à partir des données de l'enquête n'ont pas montré d'influence significative des valeurs de dégradabilité mesurée *in vitro* sur l'erreur de prédiction de la production laitière. Pourtant, Oba et Allen (1999) ou Ivan et al., (2005) ont mis en avant un impact non négligeable de ce critère sur les performances laitières. Dans un premier temps la fiabilité et la précision des mesures de dégradabilités est étudiée, puis dans un second temps les limites de l'enquête sont exposées.

4.1. Fiabilité et précision des mesures de dégradabilité

Il semble tout d'abord intéressant de noter que bien qu'elles soient souvent utilisées, les mesures *in vitro* ne sont pas considérées comme une méthode de référence. L'organisme Américain : National Forage Testing Association (NFTA) n'a pas certifié la mesure *in vitro* comme technique de référence pour l'analyse des fourrages en lien avec la méthode de préparation de l'analyse (Berthiaume et al., 2015). De plus, la variabilité des mesures intra et inter-laboratoire de cette méthode est critiquée et certains points de la méthode comme les temps d'incubation font toujours débat (Spanghero et al., 2010).

Les bases de données ARVALIM® et INRA fournissent des données sur la composition chimique et la dégradation ruminale du maïs fourrage (Peyrat, 2014). Les dégradabilités sont, dans ce cas, mesurées *in sacco* suivant la méthode décrite dans la partie 1.2.4. . Bien que la méthode de mesure diffère de celle utilisée dans ce projet, il semble intéressant de comparer les valeurs obtenues. Un récapitulatif de ces bases de données est disponible dans les tableaux 14 et 15. Globalement, les valeurs de dégradabilité mesurée *in vitro* sont plus faibles. Les valeurs d'Invivo Labs se répartissent sur des gammes de variation plus importantes avec des minimas souvent proches de zéro. La sous-estimation des dégradabilités par la méthode *in vitro* pourrait expliquer en partie les différences constatées. Cependant cette hypothèse n'explique pas la variabilité plus conséquente des valeurs *in vitro*.

Dans leur recherche sur la digestibilité des fibres chez la vache laitière Lopes et al., (2015) ont comparé plusieurs méthode d'analyse. Des analyses de digestibilité totale de la fibre ont été réalisées *in vivo* (cf. 1.2.4.). En parallèle et sur les mêmes échantillons une dégradabilité *in vitro* du NDF à 30h a été conduite suivant une méthode similaire à celle utilisée lors de ce projet. Les résultats de ces analyses sont comparés dans le graphique de la figure 23. Le coefficient de détermination égale à 0,02 atteste d'un lien quasi-nul entre les valeurs *in vivo* et *in vitro*.

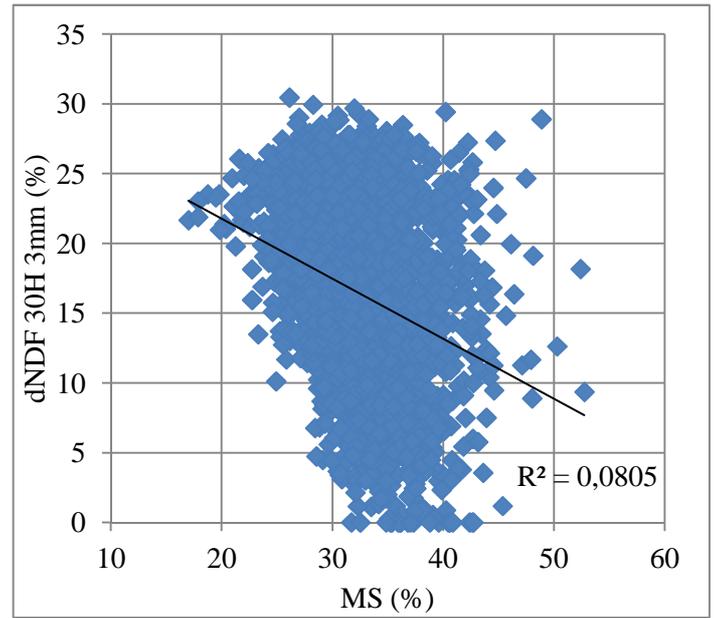
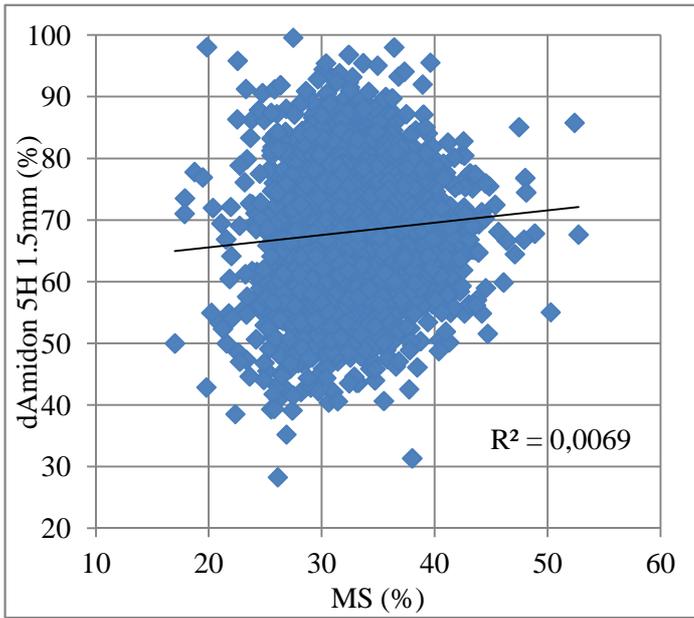


Figure 24 : Dégradabilité de l'amidon et du NDF en fonction de la MS (Analyses 2015 Invivo Labs)

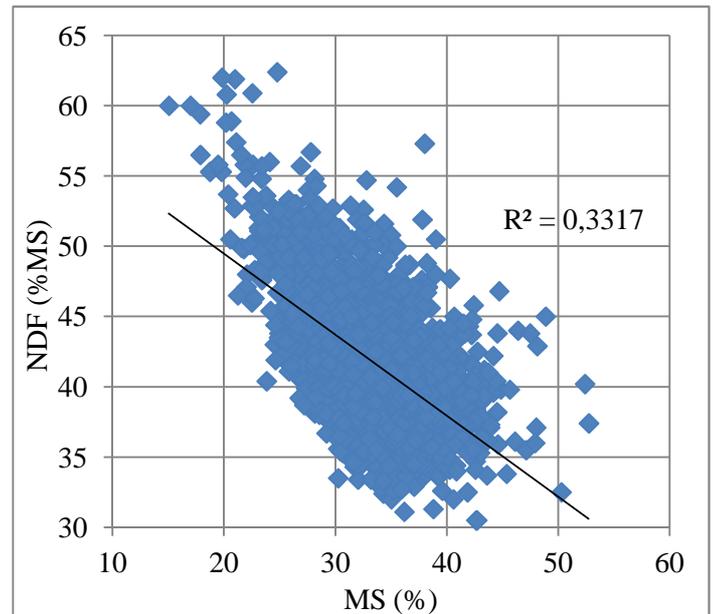
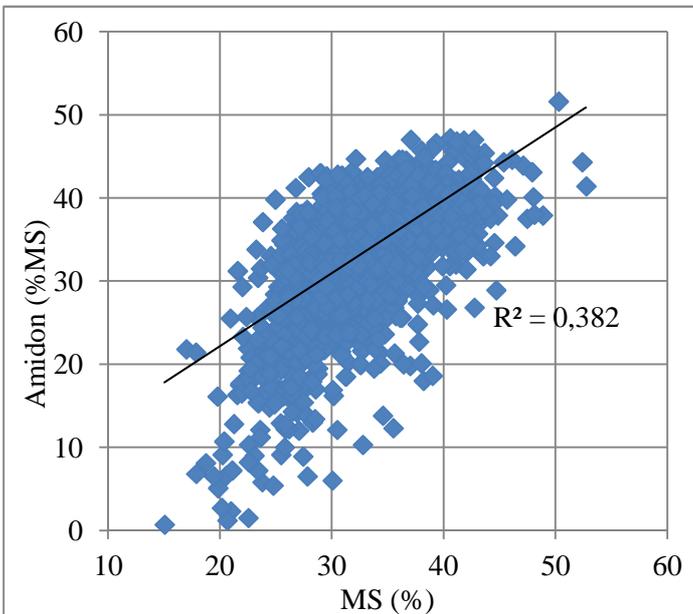


Figure 25 : Teneur en amidon et NDF en fonction de la MS (Analyses 2015 Invivo Labs)

Les analyses *in vivo* reflètent la digestion des fibres sur l'ensemble du tractus digestif. Les analyses *in vitro*, elles, sont censées représenter la digestion réalisée dans le rumen. Cela pourrait être à l'origine de l'absence de lien entre les deux techniques de mesure. Cependant, il est important de rappeler que la majorité de la digestion des fibres se fait au niveau du rumen. D'après ces résultats, il est possible de conclure que les dégradabilités *in vitro* reflètent mal la digestion faite *in vivo*. Partant de ce constat, une équation visant à prédire les valeurs *in vivo* à partir des valeurs *in vitro* a été développée par la R&D Néovia. Cette équation repose sur un nombre limité de données. Les valeurs de digestion *in vivo* estimée par cette équation n'ont pas donné de résultats probants dans l'explication du Delta-Lait.

Dans ces recherches Peyrat a mis en avant le rôle de la maturité du maïs sur la dégradabilité du NDF et de l'amidon. L'étude a porté sur 32 maïs différents (4 variétés, 4 stades de maturité et 2 années de culture). Une différence significative de dégradabilité a été trouvée entre les stades de maturité et cela indépendamment de la variété ou de l'année de récolte. Il est intéressant de vérifier si un parallèle peut être fait entre les résultats de cette publication et les données du projet. Les graphiques de la figure 24 donnent les dégradabilités de l'amidon et du NDF mesuré en fonction du taux de MS qui est un bon indicateur de la maturité (Carpentier et Cabon, 2011). Aucun lien entre la MS et les dégradabilités n'est observé dans les données de mesure du projet. La relation entre ces variables pourrait être diluée par la grande diversité des maïs contenue dans la base de données. En effet, les échantillons viennent de la France entière, les variétés et les conditions de culture, de récolte, etc... sont donc très différentes. Cependant, sur cette même base, sans tri particulier des données, il est possible de montrer un impact de la MS sur la teneur en amidon ou en NDF. Les graphiques de la figure 25 illustrent cette relation.

Lopes et al., (2015) ont développés un critère de digestibilité de la fibre qui visent à mieux représenter les valeurs obtenues *in vivo* : Total Tract NDF Digestibility (TTNDFD). Ce critère s'appuie sur des mesures réalisées *in vitro*. Pour un même échantillon, différentes incubations avec des durées variables sont menées. Elles permettent d'évaluer la part de la fibre indigestible et des taux de digestion de la fibre potentiellement digestible. Le graphique de la figure 26 (page suivante) compare les valeurs de TTNDFD aux valeurs obtenues *in vivo*. Une bonne liaison est observée avec un $R^2 = 0,68$. Ainsi, à l'aide de mesure *in vitro* il est possible d'être représentatif des valeurs *in vivo* mais cela implique un protocole de mesure contraignant.

Ces différents éléments remettent en cause la fiabilité des mesures de dégradabilité réalisée dans ce projet. Cependant, elles ne sont pas la seule source d'imprécision ayant un impact sur les résultats.

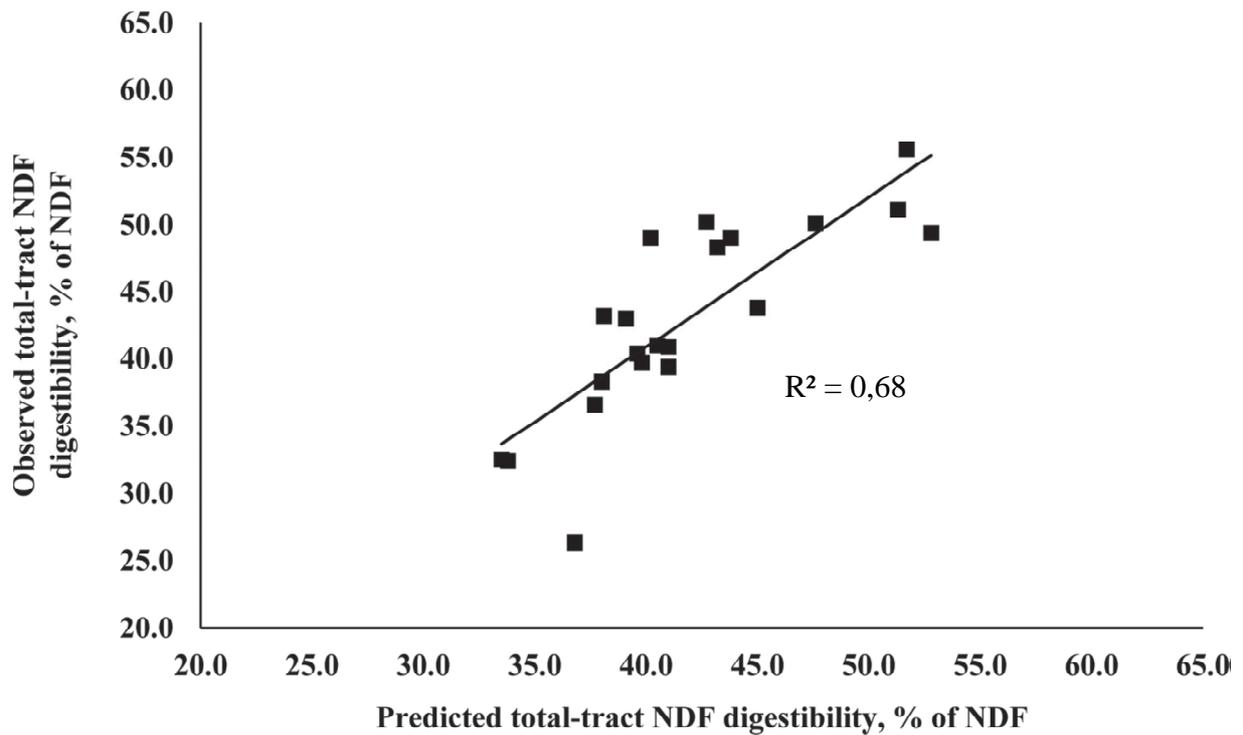


Figure 26 : Comparaison des valeurs TTNDFD aux valeurs obtenues in vivo (Lopes et al., 2015)

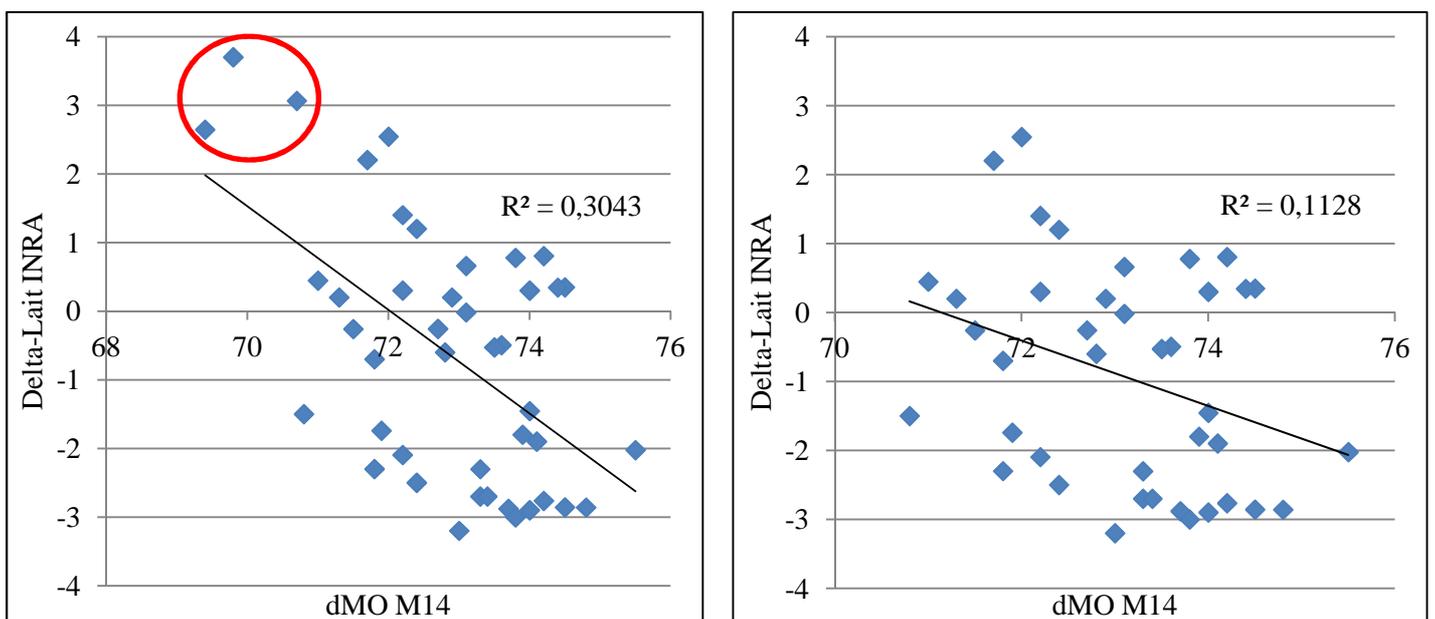


Figure 27 : Influence d'individus atypiques sur la corrélation entre le Delta Lait INRA et la dMO M14

4.2. Limites des données de l'enquête

Les résultats ont montré un impact non négligeable de la CI sur l'erreur de prédiction en utilisant l'UELe ($R^2 : 0,13$) ou l'UEL M14 ($R^2 : 0,23$). Cela peut être expliqué en partie par les différentes approximations qui sont faites dans la détermination de ce facteur. La CI dépend du poids et du format des animaux. Lors de l'enquête seule une évaluation de la note d'état corporelle a été réalisée, les poids et tailles des animaux n'ont pas été mesurés pour des raisons pratiques. L'utilisation de valeurs moyennes entraîne une certaine imprécision dans le calcul de la CI. La quantité de ration distribuée dans chaque élevage est connue, la possibilité de peser la ration distribuée fait partie du cahier des charges de l'enquête. Cependant, une partie de la ration n'est pas consommée ce qui constitue les refus. Ils n'ont pas été pesés pendant l'enquête. Pourtant ils représentent parfois une part non négligeable de la ration. Cela induit une approximation dans le calcul des quantités de ration ingérée par la vache moyenne.

Les influences des différents individus de l'enquête sur la significativité des résultats est variable. Certains d'entre eux ont un poids beaucoup plus important. Par exemple, au niveau de l'influence de la dMO M14 sur le Delta Lait M14 trois exploitations ont un rôle prépondérant. Les graphiques de la figure 27, montrent que ces trois individus ont des valeurs de dMO particulièrement faible et que leur retrait du jeu de données diminue fortement le coefficient de corrélation (divisé par 2,7). Comme il l'a été évoqué précédemment, les valeurs UEL et UFL sont calculées à partir de la dMO. Ce sont donc des indicateurs fortement corrélés à la dMO (respectivement -0,87 et 0,98). Ainsi, les observations faites pour la dMO M14 sont également valables pour l'UEL et UFL.

Les différents éléments de discussions présentés dans cette partie permettent de mieux comprendre les résultats obtenus lors de ce stage et d'adapter les perspectives à envisager.

Conclusion et perspectives

La dégradabilité des fibres et de l'amidon du maïs ensilage dans le rumen ont selon diverses sources une influence alimentaire et zootechnique non-négligeable chez la vache laitière. La Spectrométrie Proche Infrarouge permet d'obtenir ces valeurs de dégradabilité rapidement et à faible coût. Ainsi, leur intégration dans la méthode de rationnement des équipes Evialis a été envisagée afin d'améliorer la précision du conseil technique. Une enquête terrain a été conduite afin d'observer l'influence de ces critères sur la précision du rationnement. Les résultats obtenus lors de ce stage ne montrent pas d'influence significative des valeurs de dégradabilités mesurées sur la précision de la prédiction de la production laitière. La confrontation des résultats de ce projet à la bibliographie souligne un manque de fiabilité et de précision des mesures de dégradabilité réalisées. L'évaluation des quantités d'aliments ingérées par les animaux lors de l'enquête constitue également une limite à la précision des résultats.

Les observations faites lors de ce travail permettent d'établir des perspectives à ce projet. Dans un premier temps, l'utilisation de la formule de l'INRA pour calculer les UEL des maïs peut être envisagée. Lors de sa mise au point en 1998 l'UELe avait été comparé au système INRA. Les résultats montraient une meilleure évaluation de l'encombrement par l'UELe. (Communication interne Néovia). Depuis, les calculs de l'INRA ont connu des modifications notamment en 2007. D'après les résultats de ce stage, cette mise à jour de l'UEL semble l'avoir rendu plus précise que l'UELe.

Une remise en question des techniques de mesures de dégradabilité du NDF et de l'amidon doit être considérée. Leur fiabilité actuelle n'est pas suffisante pour qu'elle soit valorisée. L'utilisation d'autres méthodes *in vitro*, comme celle de Lopes et al., (2015) pourrait être une solution. Mais, elles impliquent des investissements économiques et de main d'œuvre important.

D'autres pistes peuvent être approfondies pour améliorer la précision du rationnement. L'évaluation de l'ingestion des animaux est présentée comme une limite dans la prédiction de la production laitière. L'élaboration d'une méthode permettant d'évaluer sur le terrain avec précision la matière sèche ingérée pourrait limiter les biais rencontrés.

Références

Bibliographie

- Aufrère J., Baumont R., Delaby L., Peccatte J.R., Dulphy J.P., 2007. Prédiction de la digestibilité des fourrages par la méthode pepsine-cellulase. Le point sur les équations proposées. *INRA Production Animales*. 20(2). 129-136.
- Carpentier B., Cabon G., 2011. Le maïs fourrage : élaboration du rendement et de la qualité, récolte et conservation. *Fourrages*. 205. 11-23.
- Coulon J.B., Remond B., 1991. Réponses de la production et de la composition du lait de vache aux variations d'apports nutritifs. *INRA Production Animales*. 4(1), 49-56.
- Der Berdrosian M.C., Nestor K.E., Kung L., 2012. The effects of hybrid, maturity, and length of storage on the composition and nutritive value of corn silage. *Journal of Dairy Science*. 95. 5115-5126.
- Faverdin P., Delagarde R., Delaby L., 2006. Prédiction de l'ingestion des vaches laitières au cours de la lactation. *Rencontre Recherche Ruminant*. 13. 85-88.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Quae Editions, Paris, France. 307p.
- Ivan S.K., Grant R.J., Weakley D., Beck J., 2005. Comparison of a corn silage hybrid with high cell-wall content and digestibility with a hybrid of lower cell-wall content on performance of Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 88. 244-254.
- Lopes F., Ruh K., Combs D.K., 2015. Validation of an approach to predict total tract fiber digestibility using a standardized in vitro technique for different diets fed to high producing dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 98, 2596-2602.
- Oba M., Allen M.S., 1999. Evaluation of the importance of the digestibility of Neutral Detergent Fiber from forage: Effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 82. 589-596.
- Peyrat J., 2014. Digestion de l'amidon et des parois végétales du maïs fourrage chez les ruminants : conséquences sur l'évaluation de sa valeur nutritive. Thèse de l'École Doctorale des Sciences de la Vie, de la Santé, Agronomie, Environnement. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand, France.
- Sauvant D., 1997. Conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez les ruminants. *Inra Productions Animales*. 10(4). 287-300.
- Spanghero M., Berzaghi P., Fortina R., Masoero F., Rapetti L., Zanfi C., Tassone S., Gallo A., Colombini S. et Ferlito J.C. 2010. Technical note: Precision and accuracy of in vitro digestion of neutral detergent fiber and predicted net energy of lactation content of fibrous feeds. *Journal of Dairy Science*. 93, 4855-4859.

Thivend P., Fonty G., Jouany J.P., Durand M., Gouet P., 1985. Le fermenteur rumen. *Reproduction Nutrition et Développement*. 25 (4B), 729-753.

Sitographie

Evalis, 2016. Présentation d'Evalis, <http://www.evalis.fr/fre/> Consulté le 04/07/2016.

Autres documents

Association Générale des Producteurs de Maïs (AGPM), 2014. Bilan de campagne maïs 2014, une année record. Dossier de Presse AGPM 19/11/2014.

Agreste, 2016. Semis 2016 : hausse des cultures d'hiver, baisse des cultures de printemps à l'exception de la betterave. *Agreste Infos rapides – Grandes Cultures et fourrages*. 3. 1-4.

Berthiaume R., Fournier A., Tremblay G., 2015. La digestibilité des fourrages. Conférence : Journée d'information scientifique sur les bovins laitiers et les plantes fourragères. CRAAQ Disponible sur : http://www.craaq.qc.ca/documents/files/EBOV1401/berthiaume_resume.pdf Consulté le 09/06/2016.

Cogedis, 2015. Productions animales, chiffres clés, résultats 2014-2015. 24p.
Merci à Olivier Perret.

Guillaume S., 2015, Intérêt de l'intégration de la digestibilité NDF pour la prédiction de la valeur énergétique des ensilages de maïs. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur en agriculture. ESITPA Rouen. 125p.

Institut de l'Élevage, 2015. Résultats de contrôle laitier des espèces bovine, caprine et ovine. 111p. Disponible sur : <http://idele.fr/recherche/publication/idelesolr/recommends/resultats-de-contrôle-laitier-france-2015.html>.

Jouany J.P., Mieux comprendre le rumen, un fermenteur multitâche très efficace. Disponible sur : <http://www.bicarz.com/fr/binaries/Etude-Jouany-178384.pdf>. Consulté le 12/07/2016.

You G., 2016. Marchés mondiaux des produits laitiers, sous le flot de l'Europe du Nord. Conférences : Les marchés mondiaux du lait et de la viande en 2016. 8-9 Juin 2016. Paris France.

Annexes

Annexe I : Protocole simplifié des mesures in vitro (à partir du protocole R&D de Neovia)

Dispositif expérimental

Animaux

Les animaux sont utilisés comme donneurs de contenu ruminal. Les prélèvements de jus de rumen s'effectuent sur 3 vaches laitières taries puis hystérectomisées de race Prim'Holstein, fistulées du rumen. Une seule vache pourrait permettre de collecter un volume suffisant pour la fabrication de l'inoculum. Cependant, trois d'entre elles sont nécessaires afin de limiter les variations inter-essais liées à l'inoculum en assurant une plus grande variété microbologique de ce dernier.

Logement

Les vaches sont logées à la station expérimentale de St-Nolff, en stabulation libre à logette. Elles sont maintenues à l'auge pour les prélèvements, réalisés à jeun (depuis le dernier repas de la veille) afin de limiter les variabilités de l'inoculum en lien avec la cinétique postprandiale. Elles disposent en permanence d'un accès libre à l'eau de boisson distribuée dans des abreuvoirs automatiques.

Alimentation

TABLEAU 1 : Ration alimentaire de base des animaux

Heure de distribution	Ensilage de maïs	Foin	Aliment correcteur EV 101 017
08h30 (Kg MB)	5.5	0.5	1
17h30 (Kg MB)	5.5	0.5	1
Total / jour (Kg MB)	11	1	2

Sachets inoculés

Les substrats sont mis dans des sachets nylons. Les sachets nylons sont placés dans des erlenmeyers contenant une solution tampon et de l'inoculum. Les erlenmeyers sont placés dans un bain-marie statique.

La cinétique de dégradation des substrats est déterminée selon 3 points horaires après inoculation : 2h, 5h et 30h.

Chaque ensilage de maïs sera évalué selon 2 moutures, 1,5mm et 3 mm (Broyeur Retsch), aux points horaires 2h et 5h. Au point horaire 30h, seule la mouture 3mm est évaluée. Ainsi il y a 2 substrats par maïs (mouture 1,5 mm et mouture 3 mm).

Il y a 3 répétitions par point horaire et par substrat. Ainsi, pour chaque maïs 2 moutures x 2 points horaires (2h, 5h) x 3 répétitions + 1 mouture x 1 point horaire (30h) x 3 répétitions = 15 sachets sont inoculés.

Étant donné que dans chaque série il y a toujours un maïs utilisé comme témoin interne, lors de chaque inoculation, $(225 - 15) / 15 = 14$ maïs sont évalués.

Préparation technique

Prise d'échantillon et utilisation

Pour chaque ensilage de maïs un échantillon d'environ 3 kg est prélevé.

Après homogénéisation, chaque échantillon est divisé en 3 sous échantillons :

- Sous échantillon 1 : pour séchage en étuve, puis broyage avec une grille de 1mm → Pour envoi au laboratoire pour analyses (chimie, infra, scan NIR) ;
- Sous échantillon 2 : pour séchage en étuve, puis broyage avec une grille de 3mm ;
- Sous échantillon 3 : pour séchage en étuve, puis broyage avec une grille de 1.5mm ;

Préparation des sachets

- Les sachets sont découpés et soudés aux dimensions fixées 5*9
- Les sachets sont numérotés à l'aide d'un tampon avec encre indélébile
- Les sachets sont séchés à l'étuve 24h à 60°C
- Les sachets sont mis 20 min au dessiccateur
- Les sachets vides sont pesés à l'aide de la balance de précision n°20 (SARTORIUS)
- **Les sachets sont remplis avec environ 1.5 g MB de substrat pesés précisément.**

Préparation du milieu de dilution

Le milieu de dilution se compose de 2 solutions tampons. (Composition : 1.5 fois les préconisations Ancom). Le ratio est de 1/5 entre les deux solutions, il peut être ajusté afin que le pH du milieu de dilution soit de 6.8 à 39°C.

Préparation de l'inoculum

Le jus de rumen est préparé le jour de l'essai. Le contenu ruminal de 3 vaches est prélevé par la canule avant le repas du matin. La quantité de jus de rumen prélevée est la même entre les 3 vaches. Le pH individuel de chaque jus de rumen collecté est relevé. Le jus de rumen est collecté dans un contenant saturé en CO₂ afin d'améliorer le taux de recouvrement des protozoaires. L'ensemble du jus de rumen collecté est filtré à travers un filtre nylon de porosité 500 µm. Le flacon qui collecte le filtrat est placé dans un bain-marie à 39°C et est sous flux de CO₂.

Inoculation

- La veille de l'inoculation, les sachets sont placés dans les erlenmeyers. (5 sachets / flacons)
- Avant l'inoculation, 320 ml de milieu de dilution maintenu à 39°C est versé dans chaque erlenmeyer à inoculer. Les erlenmeyer sont ensuite placés dans un bain-marie à 39°C afin que le milieu de dilution soit à la bonne température au moment de l'inoculation.
- Inoculation : 80ml de d'inoculum sont ajoutés dans les erlenmeyers sous flux de CO₂. L'heure de début et de fin d'inoculation sont notées.
- Retrait des sachets : Le pH dans l'erlenmeyers est mesuré, les sachets sont congelés.

Traitement des sachets incubés

- Congélation et décongélation : Une fois retirés des erlenmeyers, les sachets sont immédiatement congelés (environs -18°C). Tous les sachets incubés, inoculés ou non seront congelés au moins 24h. Ils seront tous retirés en même temps du congélateur.

- Lavage et désinfection : Avant de procéder au lavage des sachets, il est vérifié que le contenu de l'ensemble des sachets est bien décongelé.

Les sachets sont lavés à l'aide d'une machine à laver : 2 min de lavage, eau courante.

- Séchage : les sachets sont séchés à l'étuve pendant 48h à 60°C.

- Pesée : A la sortie de l'étuve, les sachets sont placés 20 min au dessiccateur, le temps que les sachets refroidissent. Ensuite chaque sachet est pesé.

- Regroupement des résidus : Les 3 répétitions sont regroupées dans un sachet à échantillon. Ils sont ensuite transmis laboratoire Invivo Lab's.

Contrôles et mesures

Analyse :

Pour les ensilages de maïs frais, un profil fourrager est réalisé (sous échantillon 1)

Pour les ensilages de maïs séchés, MAT (Dumas), amidon (enzymatique) et NDF (chimie) sont déterminées.

Pour les résidus de sachets incubés *in vitro* avec jus de rumen : la détermination de la dégradabilité de la MS est déterminée pour chaque sachet. Les résidus sont poolés par échantillon d'ensilage de maïs, par mouture et par temps d'incubation et analysés pour doser l'amidon résiduel (amidon enzymatique) des points horaires 2h et 5h et le NDF résiduel pour le point horaire 30h.

Calculs de dégradabilité :

La dégradabilité est déterminée à partir de la différence de masse des sachets avant et après inoculation.

Annexe II : Questionnaire de l'enquête 2015 (Source : Guillaume, 2015)

Remarque : La mise en forme du questionnaire utilisé durant l'enquête était différente afin de faciliter la prise de notes.

Audit technique sur la valorisation des ensilages de maïs en production laitière

Date d'enquête :



L'exploitation

Elevage :

Commune :

TC :

Notes :

Effectif vaches laitières :

Référence :l

Niveau de production :l/VL/an

Race :

SAU :ha SFP :ha

L'alimentation

Transition alimentaire récente : Oui Non

Chaîne de reprise-distribution (description).....

Mélangeuse : Recycleuse Vis horizontale Vis verticale Pales

Vérification du système de pesée : Oui Non

Temps de mélange de la ration :minutes

Horaire de distribution de la ration :

Apport des concentrés : R. Complète R. Semi-complète Individuel

Fréquence de distribution :

Fourrages 1 repas 2 repas Autres: _____

Concentrés 1 distribution 2 3 4 5

Mode distribution concentrés : Robot Brouette DAC Salle de traite

Nombre d'interventions à l'auge pour repousser : 1 2 3 et +

Ration

Nom*	kg brut/j	kg brut/VL/j	Kg MS/VL/j

*Joindre les étiquettes pour les concentrés (avec les valeurs nutritionnelles)

Plan de complémentation individuel

Production	VL	Correcteur	Propylène

Pour les fourrages dont une botte est mise à disposition préciser :

Nature	Poids d'une botte	Durée d'une botte

Minéraux utilisés

Nom*	Composition (levures ?)

Qualité des fourrages apportés (autres que maïs)

Type	Coupe	Conservation	Odeur, appétence...

Résultats du Contrôle Laitier

Date du contrôle :

	Stade moyen	Lait moyen	TB	TP	Urée	CCS
Total						
Primipares						
Multipares						
<i>Par stade de lactation</i>						
< 100 jours						
100-200 j						
>200 jours						

Critères	Nombre de vaches
TP < 28	
TB-TP > 15	
TP > TB	
TB < 36	

Sur les 3 premiers contrôles (-100i de lactation)

Tout le troupeau

La Table d'alimentation

Accès à la ration

Un cornadis par vache à l'auge : Oui Non

Auge abrité de la pluie : Oui Non

Fond d'auge facilement accessible : Oui Non

Accès au foin ou à la paille

Nombre de râteliers : emplacement :

La botte est bien déroulée : Oui Non

Accès à l'eau

Nombre d'abreuvoirs : pour Vaches

Accès aux abreuvoirs: ++ + -

Propreté de l'eau : ++ + -

Environnement du bâtiment

Robot de traite: Oui Non

Ambiance générale: Satisfaisant Non satisfaisant

Ventilation du bâtiment : Satisfaisant Non satisfaisant

Type de couchage : Logette paillée Matelas Aire paillée

Surface disponible : Satisfaisant Non satisfaisant

Propreté des vaches : ++ + -

Tamissage Ration

	Total	< 1cm	1 à 2 cm	>2 cm
Recommandation		60-70 %	20-25 %	7-10 %
Ration (g)				
%				

Observation du troupeau (résultats sur 3 jours)

Morphologie, format : Grand Moyen Petit

Bouses : Liquide Normal Solide

Présences de fibres : ++ + Normal

Présences de grains : ++ + Normal

Couleur : Vert foncé Noirâtre Jaunâtre

Rumination : Satisfaisant Non satisfaisant

1 vache sur 2 au repos (couchée ou debout) rumine : oui non

Vaches	Stade de lactation	NEC réelle	NEC théorique

Au silo de maïs

Tamissage Ensilage de maïs

	Total	< 1 cm	1 à 2 cm	>2 cm
Recommandation		65-70 %	30-35 %	< 2
Ens. de maïs (g)				
%				

Type de silo :

Eclatement du grain : ++ + - - -

Présence de moisissures : Oui Non

Si oui, sont-elles retirées au silo : Oui Non

Qualité de conservation : Bonne Moyenne Mauvaise

T° extérieur :

T° du tas d'ensilage :

Remarques (odeur, appétences...) :

Commentaires

.....

	<p>Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage.</p> <p>Spécialité : Science et Production Animale</p> <p>Spécialisation / option : Ingénierie Zootechnie</p> <p>Enseignant référent : Jocelyne Flament</p>
<p>Auteur(s) : Rémi Vial</p> <p>Date de naissance* : 14/09/1993</p>	<p>Organisme d'accueil : Invivo NSA</p> <p>Adresse : Talhouët, 56 250 St-Nolff</p>
<p>Nb pages : 20 Annexe(s) : 10</p>	
<p>Année de soutenance : 2016</p>	<p>Maître de stage : Antoine Weinachter</p>
<p>Titre français : Intérêt de l'intégration de la dégradabilité de l'amidon et des parois végétales dans l'évaluation des valeurs nutritives de l'ensilage de maïs.</p> <p>Titre anglais : Interest of the integration of starch dégradabilité and fiber digestibility in the evaluation of corn silage nutritional values.</p>	
<p>Résumé : L'ensilage de maïs est un fourrage très utilisé dans les élevages de bovins laitiers. Ainsi, une évaluation précise de sa valeur énergétique est essentielle pour le rationnement. Evalis, société du groupe Néovia, est spécialisée dans la nutrition animale. La société cherche à fournir un conseil technique précis à ses clients éleveurs. La R&D de Néovia a mis en place la mesure en routine de la dégradabilité in vitro du NDF et de l'amidon du maïs ensilage en utilisant la Spectrométrie Proche Infrarouge. Le travail présenté ici cherche à évaluer l'intérêt de l'intégration de ces critères dans la méthode de rationnement suivit par les équipes d'Evalis. L'influence de ces critères sur la précision du rationnement a été évaluée à travers une enquête chez des clients d'Evalis (43 exploitations). Des calculs de prédiction de la production laitière ont été réalisés et comparés aux productions réelles. Les écarts entre la prédiction et la réalité (Delta-Lait) sont variables et parfois importants. Les dégradabilités mesurées par Néovia, n'ont pas permis d'expliquer la variabilité du Delta-Lait. La confrontation des résultats obtenus à la bibliographie montre que les mesures de la dégradabilité du projet sont peu précises et peu fiables. Une remise en cause de la technique de mesure de la dégradabilité in vitro est envisageable.</p>	
<p>Abstract: Corn silage is widely used in dairy cattle. The evaluation of his nutritional values is critical for feed rationing. Evalis, member of the group Néovia, is specialized in animal nutrition. The society tries to give accurate technical advice to her customers. Néovia's R&D has developed a measure of NDF and starch degradability in vitro of corn silage using Near Infrared Spectroscopy. The topic of the work presented in this report is to evaluate the interest of the integration of starch digestibility and fiber digestibility in the Evalis rationing system. A survey among Evalis customers (43 farms) was done to evaluate the influence of those variables in the rationing precision. Predictions calculations of the milk production were done and compare to the real production (Delta-Lait). The difference between prediction and the reality is variable and sometimes important. The variability of "Delta-Lait" is not explained by the degradability measured by Néovia. The study of bibliographic reference shown that the degradabilities measured by Neovia are not precise and not trustable. The measuring technique of in vitro degradability used in this project can be questioned.</p>	
<p>Mots-clés : Ensilage de maïs ; Vache laitière ; Dégradabilité ; Amidon ; Fibre</p> <p>Key Words: Corn silage ; Dairy cows ; Digestibility ; Starch ; Fiber</p>	

