



# Digestibilité de l'amidon et des parois végétales du maïs fourrage : conséquences sur la prévision de sa valeur nutritive

Julie Peyrat, Pierre Noziere, Alexis Férard, Aline Le Morvan, Pierre-Vincent Protin, René Baumont

## ► To cite this version:

Julie Peyrat, Pierre Noziere, Alexis Férard, Aline Le Morvan, Pierre-Vincent Protin, et al.. Digestibilité de l'amidon et des parois végétales du maïs fourrage : conséquences sur la prévision de sa valeur nutritive. 21. Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Dec 2014, Paris, France. 4 p. hal-02740516

**HAL Id: hal-02740516**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02740516>**

Submitted on 2 Jun 2020

**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.

## Digestibilité de l'amidon et des parois végétales du maïs fourrage : conséquences sur la prévision de sa valeur nutritive

PEYRAT J. (1, 2, 3), NOZIÈRE P. (1, 2), FÉRARD A. (3), LE MORVAN A. (1, 2), PROTIN P.V. (3), BAUMONT R. (1, 2)

(1) INRA, UMR1213 Herbivores, site de Theix, F-63122 Saint-Genès Champanelle, France

(2) Clermont Université, VetAgro Sup, UMR Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

(3) ARVALIS-Institut du végétal, station expérimentale de la Jaillière, F-44370 La Chapelle Saint Sauveur, France

**RESUME** - L'ensilage de maïs, fourrage principal dans les rations des ruminants à haut niveau de production, est composé de deux fractions énergétiques : l'amidon et les parois végétales. Les proportions relatives de ces deux fractions varient fortement selon les conditions de culture, la variété et le stade de maturité de la plante à la récolte entraînant alors une grande variabilité de la nature de l'énergie apportée par l'ensilage de maïs. L'influence de ces facteurs de variation sur la digestibilité mesurée *in vivo* chez le mouton et la dégradabilité dans le rumen mesurée *in sacco* chez la vache a été étudiée pour 32 ensilages de maïs. La relative stabilité de la digestibilité de la matière organique de la plante entière (dMO) *in vivo* avec le stade de maturité s'explique par un phénomène de compensation entre l'augmentation de la quantité d'amidon à digestibilité élevée et la baisse de la digestibilité des parois végétales (NDF). Au niveau du rumen, la dégradabilité *in sacco* de la MS et de l'amidon diminue avec le stade de maturité, celle du NDF baisse également. Le type de grain des maïs étudiés (corné vs. denté) et les caractéristiques des parois végétales (DINAG plus ou moins élevé) influencent la dégradabilité de la MS, de l'amidon et du NDF, mais son influence sur la digestibilité de la MO et de l'amidon est faible, voire inexistante pour la digestibilité du NDF. L'utilisation de l'équation de prévision de la dMO proposée par l'INRA en 1996 (équation M4) est confortée par cette étude, puisqu'elle explique 74,0 % de la variabilité de dMO mesurée *in vivo* et n'entraîne pas de biais dans les valeurs prévues. Cette étude apporte des références sur les teneurs en parois végétales digestibles et en amidon dégradable dans le rumen de l'ensilage de maïs, critères nécessaires à une meilleure évaluation de la valeur nutritive de l'ensilage de maïs dans les nouveaux systèmes d'alimentation INRA.

## Digestibility of starch and cell walls of maize silage: consequences on the prediction of its nutritive value

PEYRAT J. (1, 2, 3), NOZIÈRE P. (1, 2), FÉRARD A. (3), LE MORVAN A. (1, 2), PROTIN P.V. (3), BAUMONT R. (1, 2)

(1) INRA, UMR1213 Herbivores, site de Theix, F-63122 Saint-Genès Champanelle, France

**SUMMARY** - Maize silage, commonly used in the diet of high-yielding ruminants, provides two energetic fractions (starch and cell-walls or NDF). With the stage of maturity at harvest, type of hybrid and climatic conditions, the proportion of the two energetic fractions in the whole plant varies greatly and so, the nature of energy provided by maize silage to the animal differs. The impact of these variations on whole plant *in vivo* digestibility in sheep (OMd) and *in situ* degradability in cows were measured for 32 maize silages. The relative stability with the stage of maturity of OMd was explained by the compensation between the increase in the content of starch that is of high digestibility and the decrease in cell-wall digestibility. In the rumen, *in sacco* degradability of DM, starch and NDF (to a lesser extent) was also affected by maturity stage. Degradability of DM, starch and NDF also differs among type of maize grain (flint vs dent) and cell walls (low or high DINAG), but these effects were limited on OM and starch digestibility or even absent on NDF digestibility. The INRA equation used to predict OMd (M4) explained 74.0 % of OMd *in vivo* variability measured on sheep in this study and can be further used with actual hybrids of maize silage. This study provides new data on digestible cell-wall and rumen degradable starch contents in maize silage that will allow better evaluation of the nutritive value of maize silage in future feed evaluation systems from INRA.

## INTRODUCTION

Le maïs ensilé est le fourrage principal des rations hivernales des vaches laitières à haut niveau de production et des taurillons à l'engrais. La proportion des deux fractions énergétiques de ce fourrage, amidon et parois végétales, varie fortement selon les conditions de culture, la variété et le stade de maturité de la plante à la récolte entraînant alors potentiellement une grande variabilité de la nature des nutriments apportés par l'ensilage de maïs. La prévision de la valeur énergétique de l'ensilage de maïs repose sur l'estimation de la digestibilité de la matière organique (dMO) à partir de deux critères représentatifs de la plante entière sur pied (maïs vert) : la digestibilité enzymatique pepsine cellulase de la matière sèche, méthode Aufrère (DCS) et la teneur en matières azotées totales (MAT). Cette équation, dite M4 (Andrieu, 1995), est basée sur 254 mesures *in vivo* de la dMO du maïs « en vert » réalisées entre 1987 et 1993.

Elle explique 45 % de la variabilité des mesures. Dans l'application de cette équation, l'hypothèse est faite que la dMO de l'ensilage est égale à celle du maïs en vert. Compte tenu de l'évolution du matériel végétal et des itinéraires techniques depuis les années 1980, un dispositif expérimental a été mis en œuvre par l'INRA et Arvalis-Institut du végétal afin d'acquies de nouvelles références sur la digestibilité de l'ensilage de maïs pour i) évaluer la variabilité de la digestibilité des fractions amidon et parois végétales (NDF), élément qui fait défaut aujourd'hui pour équilibrer au mieux les rations basées sur l'ensilage de maïs, ii) évaluer la validité de l'équation de prévision M4 sur des variétés utilisées aujourd'hui et pour des stades de récoltes tardifs et iii) rechercher de nouveaux critères caractérisant le devenir des fractions amidon et parois dans le tube digestif, nécessaires aux nouveaux systèmes d'alimentation publiés à l'issue du projet SYSTALI (Sauvant et Nozière, 2013).

# 1. MATERIEL ET METHODES

Trente-deux ensilages de maïs ont été réalisés à la station expérimentale de La Jaillière (44) : au cours de deux années successives (2011 et 2012). Quatre variétés différant sur le type de grain et le critère DINAG (digestibilité de la fraction non amidon non glucides solubles) ont été utilisées (V<sub>1</sub> : corné/DINAG+, V<sub>2</sub> : corné/DINAG-, V<sub>3</sub> : hybride issu d'une lignée cornée et d'une lignée dentée/DINAG+ et V<sub>4</sub> : denté/DINAG-), puis récoltées à 4 dates correspondant à des stades de maturité (1, 2, 3 et 4) allant du stade grains laitieux au stade grains vitreux. La composition chimique (MO, amidon, NDF) des maïs en vert et ensilés, et la digestibilité pepsine-cellulase des maïs en vert ont été analysées.

## 1.1. MESURE DE LA DIGESTIBILITE IN VIVO

Les digestibilités *in vivo* de la matière organique (dMO), de l'amidon et de la fraction NDF ont été mesurées selon la méthode de référence de Demarquilly *et al.* (1995) à partir d'une collecte fécale totale pendant 6 jours sur 8 moutons castrés, logés individuellement dans des cages à digestibilité, selon un dispositif expérimental en carré latin répété.

## 1.2. MESURE DE LA DEGRADABILITE IN SACCO

Les cinétiques de dégradation dans le rumen de la matière sèche (MS), de l'amidon et du NDF des 32 maïs ensilés ont été mesurées par la méthode *in sacco* selon Peyrat *et al.* (2014) sur 3 vaches fistulées avec 6 temps d'incubation (2h, 4h, 8h, 24h, 48h et 72h) et deux répétitions. Les dégradabilités théoriques de la MS (DT<sub>MS</sub>), de l'amidon (DT<sub>Amidon</sub>) et du NDF (DT<sub>NDF</sub>) ont été calculées par la méthode pas à pas (Kristensen *et al.*, 1982) en prenant en compte un taux de transit des particules hors du rumen de 6% par heure pour l'amidon, de 4% par heure pour la MS et de 2% par heure pour le NDF.

## 1.3. ANALYSES STATISTIQUES

Les effets du stade de maturité, de la variété, de l'année de récolte et leurs interactions sur la composition chimique, la digestibilité *in vivo* et la dégradabilité théorique *in sacco* ont été analysés avec la procédure MIXED de SAS (version 9.3, 2002).

# 2. RESULTATS

## 2.1. COMPOSITION CHIMIQUE ET DIGESTIBILITE IN VIVO DANS L'ENSEMBLE DU TUBE DIGESTIF

Des interactions significatives ont été observées entre les effets maturité et hybride, maturité et année et hybride et année de récolte sur la digestibilité de la MO et de l'amidon. Pour la digestibilité *in vivo* du NDF, seule l'interaction entre l'effet année et maturité est significative.

### 2.1.1. Influence du stade de maturité

Avec le stade de maturité, la teneur en amidon des ensilages de maïs augmente en moyenne de 138 g/kg MS entre le stade 1 et le stade 4, au détriment de la teneur en NDF qui diminue de 69 g/kg MS (Tableau 1). La dMO évolue peu : elle augmente légèrement entre le stade 1 laitieux-pâteux

(MS<300 g/kg) et les stades 2 et 3 (MS entre 300 et 350 g/kg) puis diminue au stade 4 (MS>400 g/kg).

La digestibilité de l'amidon, très élevée (en moyenne 99,0 %) n'évolue également que très faiblement avec la maturité. En revanche, la digestibilité du NDF diminue fortement entre le premier et le dernier stade de maturité (-11,7 points).

### 2.1.2. Influence de la variété

La variété V<sub>3</sub>, la plus riche en amidon, a des teneurs en MS et en MO plus élevées que les variétés V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> et V<sub>4</sub>. La variété V<sub>2</sub> est celle qui contient le moins d'amidon. Inversement reliée à la teneur en amidon, la teneur en NDF est la plus importante pour la variété V<sub>2</sub> (393 g/kg MS) et la plus faible pour la variété V<sub>4</sub> (331 g/kg MS). La variété V<sub>3</sub> se distingue des autres par une digestibilité de la MO plus élevée (p<0,05) tandis qu'aucune différence de dMO n'est observée entre les autres variétés. L'effet variété est significatif pour la digestibilité de l'amidon, même si les variations sont très faibles, mais pas pour celle du NDF.

### 2.1.3. Influence de l'année de récolte

L'année 2011, caractérisée par des pluies régulières et des températures plutôt chaudes tout au long du développement de la culture jusqu'à la maturation du grain (4 jours d'eau d'irrigation), a conduit à des maïs plus riches en amidon qu'en 2012. Par rapport à 2011, la pluviométrie en 2012 a été limitée, malgré l'irrigation au cours de la maturation. De plus, en 2012, les déficits de somme de température (- 34°C base 6) et de lumière (-10 % de rayonnement global) enregistrés entre le 15 juillet et le 31 août, ont limité la photosynthèse engendrant une plus faible production de sucres et donc de stockage de l'amidon dans les grains. Les maïs de l'année 2012 ont donc des teneurs en amidon plus faibles et des teneurs en NDF plus élevées qu'en 2011. En conséquence, avec une teneur en amidon (très digestible) et une digestibilité du NDF plus élevées, les maïs récoltés en 2011 ont une dMO plus élevée qu'en 2012.

## 2.2. DEGRADABILITE IN SACCO DANS LE RUMEN

Des interactions significatives deux à deux ont été observées entre les effets maturité, hybride, conservation et année de récolte pour la dégradabilité de la MS (excepté pour l'interaction entre l'effet conservation et année), de l'amidon et du NDF (sauf pour l'interaction entre l'effet maturité et conservation).

### 2.2.1. Influence du stade de maturité

La dégradabilité de la MS (DT<sub>MS</sub>) des maïs ensilés diminue avec l'avancement de la maturité, notamment entre le deuxième et le dernier stade (-5,5 points, Tableau 2). La dégradabilité de l'amidon (DT<sub>Amidon</sub>) diminue fortement entre le premier et le deuxième stade de maturité (-10,4 points), est stable entre le deuxième et le troisième stade puis diminue encore au dernier stade pour atteindre 56,2 %. La diminution de la dégradabilité du NDF (DT<sub>NDF</sub>) est seulement significative pour le dernier stade de maturité (-4 points en moyenne par rapport aux trois premiers stades).

**Tableau 1.** Effets du stade de maturité, de la variété et de l'année de récolte sur la composition chimique et la digestibilité *in vivo* des ensilages de maïs mesurée chez le mouton.

	Stade de maturité (M)				Variété (V)				Année (A)		Seuil de signification			
	1	2	3	4	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	2011	2012	ETR	M	V	A
<b>Composition chimique (g/kg)</b>														
MS	283 <sup>a</sup>	328 <sup>b</sup>	337 <sup>b</sup>	407 <sup>c</sup>	339 <sup>a</sup>	330 <sup>ab</sup>	362 <sup>c</sup>	324 <sup>b</sup>	333 <sup>a</sup>	345 <sup>b</sup>	13,4	<0,01	<0,01	<0,01
MO	933 <sup>a</sup>	942 <sup>b</sup>	941 <sup>b</sup>	953 <sup>c</sup>	943 <sup>c</sup>	941 <sup>b</sup>	946 <sup>d</sup>	940 <sup>a</sup>	945 <sup>b</sup>	940 <sup>a</sup>	1,3	<0,01	<0,01	<0,01
NDF	405 <sup>c</sup>	366 <sup>b</sup>	357 <sup>b</sup>	336 <sup>a</sup>	375 <sup>b</sup>	393 <sup>c</sup>	331 <sup>a</sup>	364 <sup>b</sup>	335 <sup>a</sup>	397 <sup>b</sup>	19,9	<0,01	<0,01	<0,01
Amidon	276 <sup>a</sup>	320 <sup>b</sup>	355 <sup>c</sup>	414 <sup>d</sup>	334 <sup>b</sup>	307 <sup>a</sup>	382 <sup>c</sup>	341 <sup>b</sup>	376 <sup>b</sup>	305 <sup>a</sup>	24,9	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Digestibilités <i>in vivo</i> (%)</b>														
MO	72,5 <sup>a</sup>	73,6 <sup>b</sup>	73,4 <sup>b</sup>	72,2 <sup>a</sup>	72,3 <sup>a</sup>	71,9 <sup>a</sup>	74,7 <sup>b</sup>	72,8 <sup>a</sup>	74,4 <sup>b</sup>	71,5 <sup>a</sup>	2,33	<0,01	<0,01	<0,01
NDF	55,1 <sup>c</sup>	51,5 <sup>b</sup>	50,0 <sup>b</sup>	43,4 <sup>a</sup>	50,4	51,1	49,7	48,7	51,4 <sup>b</sup>	48,6 <sup>a</sup>	5,37	<0,01	0,51	<0,01
Amidon	98,9 <sup>b</sup>	98,7 <sup>a</sup>	98,8 <sup>b</sup>	99,4 <sup>c</sup>	98,4 <sup>a</sup>	99,0 <sup>c</sup>	98,9 <sup>b</sup>	99,6 <sup>d</sup>	98,8 <sup>a</sup>	99,2 <sup>b</sup>	0,14	<0,01	<0,01	<0,01

Pour chaque effet (M, V ou A), les lettres a, b, c et d représentent les différences significatives au seuil de p<0,01.

**Tableau 2.** Effets du stade de maturité, de la variété et de l'année de récolte sur de la dégradabilité *in sacco* des ensilages de maïs mesurée dans le rumen chez la vache.

	Stade de maturité (M)				Variété (V)				Année (A)			Seuil de signification		
	1	2	3	4	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	2011	2012	ETR	M	V	A
DT <sub>MS</sub> (%)	64,6 <sup>c</sup>	63,8 <sup>bc</sup>	62,6 <sup>b</sup>	58,3 <sup>a</sup>	57,4 <sup>a</sup>	60,1 <sup>b</sup>	67,0 <sup>d</sup>	64,6 <sup>c</sup>	62,2	62,4	1,32	<0,01	<0,01	0,48
DT <sub>NDF</sub> (%)	57,0 <sup>b</sup>	57,3 <sup>b</sup>	56,1 <sup>b</sup>	52,0 <sup>a</sup>	52,0 <sup>a</sup>	56,2 <sup>c</sup>	59,8 <sup>d</sup>	54,4 <sup>b</sup>	54,8 <sup>a</sup>	56,4 <sup>b</sup>	1,75	<0,01	<0,01	<0,01
DT <sub>Amidon</sub> (%)	75,6 <sup>c</sup>	65,2 <sup>b</sup>	65,9 <sup>b</sup>	60,5 <sup>a</sup>	59,6 <sup>a</sup>	61,4 <sup>b</sup>	70,4 <sup>c</sup>	75,8 <sup>d</sup>	66,3 <sup>a</sup>	67,3 <sup>b</sup>	0,90	<0,01	<0,01	<0,01

Pour chaque effet (M, V ou A), les lettres a, b et c, représentent les différences significatives au seuil de  $p < 0,01$ .

### 2.2.2. Influence de la variété

La variété V<sub>3</sub>, qui a la teneur MS à la récolte la plus élevée a aussi une DT<sub>MS</sub> plus élevée que celle de la variété V<sub>4</sub>, dont la DT<sub>MS</sub> est plus importante que celles des variétés V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>. Entre ces deux dernières variétés, c'est V<sub>2</sub> (plus riche en NDF que V<sub>1</sub>) qui a la DT<sub>MS</sub> la plus élevée. Pour la fraction amidon, la variété V<sub>4</sub> a une dégradabilité plus élevée que la variété V<sub>3</sub> et que les variétés V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>, cette dernière ayant la DT<sub>Amidon</sub> la plus faible. Comme pour la MS, la DT<sub>NDF</sub> est la plus importante pour la variété V<sub>3</sub>, et est la plus faible pour les variétés V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>.

### 2.2.3. Influence de l'année de récolte

L'effet de l'année de récolte sur la dégradabilité *in sacco* dans le rumen de l'ensilage de maïs est faible. Il est non significatif pour la MS et conduit à des valeurs légèrement plus élevées en 2012 pour la DT<sub>Amidon</sub> et la DT<sub>NDF</sub>.

## 3. DISCUSSION

### 3.1. VARIABILITE DE LA DIGESTIBILITE DANS L'ENSEMBLE DU TUBE DIGESTIF ET DE LA DEGRADABILITE DANS LE RUMEN

Le dispositif expérimental mis en place et répété sur deux années de culture a permis d'obtenir des échantillons de maïs aux caractéristiques de composition chimique et de digestibilité bien distinctes en fonction des facteurs de variation étudiés : stade de maturité et variété. L'effet du stade de maturité sur la digestibilité de la MO et de l'amidon de la plante entière reste faible (1 à 2 points au maximum) alors que la digestibilité de la fraction pariétale NDF diminue fortement pour toutes les variétés (-11,7 points en moyenne) entre le stade « grain laitex » et « grain vitreux ». L'effet variété et les conditions climatiques (effet année) ont plus d'impact sur la dMO. Plus riche en amidon, la variété V<sub>3</sub> se distingue des autres par une dMO plus élevée. Au niveau des fractions, l'effet variétal est limité pour la digestibilité de l'amidon et inexistant pour celle des parois végétales. Les teneurs en amidon et les dMO significativement plus faibles des maïs récoltés en 2012 par rapport à 2011 s'expliquent par un remplissage du grain plus limité en 2012 du fait des conditions de cultures moins favorables en fin de cycle.

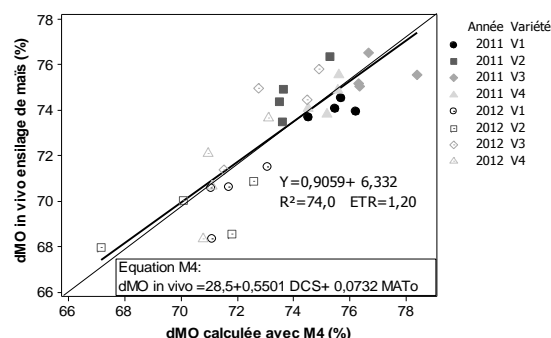
Alors que dans l'ensemble du tube digestif, la dMO et la digestibilité de l'amidon sont peu variables, la dégradabilité *in sacco* dans le rumen de la MS et de l'amidon varient fortement et diminuent avec le stade de maturité. La dégradabilité du NDF diminue aussi comme sa digestibilité, mais surtout au stade de maturité le plus tardif (> 400 g/kg MS). L'augmentation de la résistance à la dégradation ruminale de la MS et de l'amidon est notamment reliée à l'augmentation de la vitrosité (Khan *et al.*, 2014) favorisant la dureté du grain (barrière physique) et l'augmentation de la concentration de protéines insolubles de la matrice protéique encapsulant l'endosperme (barrière chimique). Ces deux facteurs contribuent à limiter l'accès des granules d'amidon aux microbes du rumen (Philippeau *et al.*, 2000). En cohérence avec sa dMO élevée, la variété V<sub>3</sub> présente la dégradabilité de la MS la plus élevée. Alors que la digestibilité du NDF de la variété V<sub>3</sub> n'est pas plus élevée, la dégradabilité du NDF dans le rumen est plus importante pour cette variété. Ceci pourrait être relié au caractère DINAG qui est plus élevé pour cette variété (58.3%) que pour les autres (54% pour V<sub>1</sub> et V<sub>4</sub> et 52% pour V<sub>2</sub>). La fraction amidon est

mieux digérée pour la variété V<sub>4</sub> qui a un grain de type denté entouré d'une plus fine matrice protéique, ce qui facilite sa dégradation par les microbes (Philippeau *et al.*, 2000). Au final, l'étude de la DT<sub>Amidon</sub>, plus ou moins élevée selon le stade de maturité ou la variété, est nécessaire pour caractériser le site de digestion de l'amidon et pour estimer l'énergie fermentescible disponible pour les microbes (valeur PDIE). Les conditions climatiques de l'année de récolte ont eu moins d'influence sur la dégradabilité de la plante entière que sur sa digestibilité dans l'ensemble du tube digestif.

### 3.2. PREVISION DE LA DIGESTIBILITE DE LA MATIERE ORGANIQUE *IN VIVO*

#### 3.2.1. Évaluation de l'équation M4

L'application de l'équation M4 pour les 32 échantillons de maïs dont la dMO *in vivo* des ensilages correspondants a été mesurée montre une bonne liaison entre les valeurs prévues (dMO vert, M4) et les valeurs mesurées (dMO ensilage, *in vivo*) (Figure 1). Les valeurs prévues expliquent 74 % de la variabilité des dMO mesurées et la relation entre valeurs prévues et mesurées est très proche de la bissectrice. Cette étude permet donc de valider l'équation M4, en particulier l'hypothèse que l'analyse de l'échantillon en vert permet de prévoir la dMO de l'ensilage. Son application est donc pertinente pour prévoir des écarts de digestibilité entre maïs fourrages. De plus cette étude confirme que parmi les critères mesurés au laboratoire sur les échantillons en vert, la digestibilité pepsine-cellulase est le paramètre le mieux corrélé avec la dMO *in vivo* ( $R^2=72,3\%$ ,  $N=32$ ).



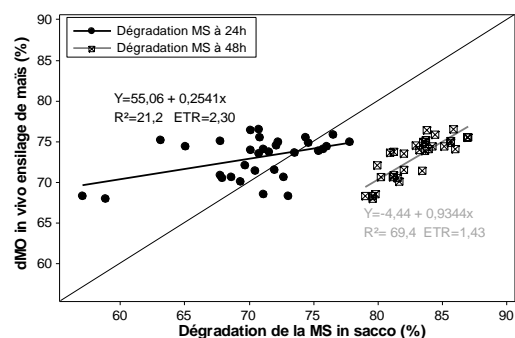
**Figure 1 :** Prévion de la dMO *in vivo* avec le modèle M4

#### 3.2.2. La dégradation *in sacco* permet-elle de prévoir la dMO *in vivo* ?

Les mesures de dégradation *in sacco* pouvant être réalisées en plus grande série que les mesures de digestibilité *in vivo*, celles-ci peuvent-elles constituer une alternative à la mesure *in vivo* ?

L'étude des liaisons entre dégradation *in sacco* de la MS et dMO *in vivo* montre que la meilleure corrélation a été obtenue avec la dégradation *in sacco* de la MS après 48h ( $R^2=69,4\%$  Figure 2). À 24h, la valeur moyenne de la dégradation *in sacco* est plus proche de celle de la dMO *in vivo*, mais la liaison est moins étroite ( $R^2=21,2\%$ ). La dégradation de la plante entière de maïs dans le compartiment rumen est en effet quasiment achevée au bout de 24h Mertens (1993). Par ailleurs, bien qu'elles soient très corrélées, la dégradation *in sacco* à 48h surestime la dMO *in vivo*, ce qui peut s'expliquer par différentes hypothèses : biais systématique de la méthode *in sacco*, temps de séjour de l'ensilage de maïs

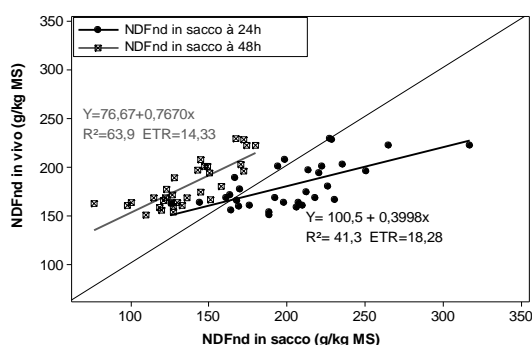
dans le tube digestif du mouton inférieur à 48 heures, et/ou par le fait que la dMO *in vivo* est une digestibilité apparente et non une digestibilité réelle.



**Figure 2 :** Relation entre la dMO *in vivo* et la dégradation de la MS *in sacco* à 24 et 48h

### 3.2.3. Relation entre la dMO *in vivo* et la fraction pariétale indigestible

D'après Andrieu *et al.* (1993), la dMO *in vivo* de l'ensilage de maïs est reliée très étroitement à sa teneur en NDF indigestible (NDFnd) évaluée à partir de la teneur en NDF de l'ensilage de maïs et de sa digestibilité *in vivo*. Nous retrouvons cette relation sur les données de cette étude ( $R^2=96,4\%$ ). Il est donc intéressant d'essayer d'évaluer l'intérêt de la méthode *in sacco* pour estimer le NDFnd. Comme pour la dMO, la mesure *in sacco* à 48h est la mieux reliée avec le NDFnd mesuré *in vivo* (Figure 3). Malgré un biais par rapport à la bissectrice, la teneur en NDF non dégradée estimée *in sacco* à 48h explique tout de même 63,9 % du NDFnd *in vivo*.



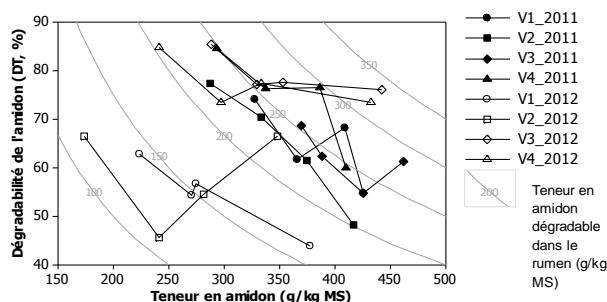
**Figure 3 :** Relation entre la teneur en parois indigestibles *in vivo* (NDFnd *in vivo*) la teneur en parois indigestibles *in sacco* (NDFnd *in sacco*) de l'ensilage de maïs

La méthode *in sacco* par l'estimation à 48h de la dégradation de la MS ou du NDFnd pourrait donc constituer une alternative aux mesures *in vivo*, longues et coûteuses (Ops *et al.*, 2013). Cependant, les conditions de sa mise en œuvre doivent être bien raisonnées : le mode de conditionnement des échantillons peut effectivement influencer le niveau de dégradation *in sacco* de la MS et du NDF des ensilages de maïs (Peyrat *et al.*, 2014).

### 3.4 VARIATIONS DE LA QUANTITE D'AMIDON DEGRADABLE DANS LE RUMEN

La partition de la digestion de l'amidon entre le rumen et les intestins a une influence sur la matière organique fermentée dans le rumen et donc sur la fourniture de protéines microbiennes, ainsi que sur les profils de nutriments absorbables (Savant et Nozière, 2013). À partir de cette étude, nous avons donc cherché à caractériser les variations de la quantité d'amidon dégradé dans le rumen, calculée à partir de la teneur en amidon et de la DT<sub>Amidon</sub> (Figure 4). Suivant le type de variété, les conditions climatiques et le stade de maturité, la quantité d'amidon dégradé dans le rumen varie de 100 à 350 g/kg MS. Les maïs récoltés en 2011 ont présenté des quantités d'amidon dégradé dans

le rumen relativement stables, en moyenne de 246 g/kg de MS, comprises entre 200 et 300 g/kg de MS t. En revanche, en 2012, les ensilages de maïs des deux variétés cornées (V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>) ont présenté des teneurs en amidon dégradé dans le rumen sensiblement plus faibles (inférieures à 200 g/kg de MS), mais avec une dMO qui reste malgré tout supérieure à 69% pour ces deux variétés. Les données de cette étude fournissent donc des pistes pour caractériser la teneur en amidon dégradé de l'ensilage de maïs selon le type de variété, les conditions climatiques lors de la culture et le stade de récolte choisi.



**Figure 4 :** Variabilité de la teneur en amidon dégradé dans le rumen des ensilages de maïs

## CONCLUSION

Ce travail a permis d'identifier des facteurs de variations de la digestibilité de la plante entière de maïs et de ses fractions amidon et parois. Pour chaque année climatique, le stade de maturité influence modérément la dMO d'un ensilage de maïs même s'il a été observé un maximum de dMO au stade pâteux du grain soit vers 30-35 %MS plante entière. Cependant, les sources d'énergie varient fortement selon la maturité du maïs : le ratio fibres NDF dégradables/amidon dégradé diminue de 1,1 à 0,7 entre les stades grains laitieux et grains vitreux. Les variétés étudiées, contrastées sur le type de grain ont présenté des profils différents de digestibilité et de dégradabilité ruminale de leurs fractions pariétales et amylacées indiquant des typologies de maïs fourrages orientées plutôt « grains » ou « fibres » pour des utilisations bien ciblées en rationnement des ruminants. L'ensemble des relations observées entre la dMO et les critères chimiques, enzymatiques et *in sacco* pourront être utilisées pour une meilleure caractérisation de la valeur nutritive de l'ensilage de maïs dans les nouvelles tables d'alimentation de l'INRA (projet Systali).

Les auteurs de cette étude remercient l'UFS et la FNPSMS pour leur soutien financier.

**Andrieu J., Demarquilly C., Dardenne P., Barrière Y., Lila M., Maupetit P., Rivière F., Femenias N., 1993.** Ann Zoot., 42, 221-249

**Andrieu J., 1995.** INRA. Prod. Anim., 8, 273-274

**Demarquilly C., Chenost M., Giger S., 1995.** Nutrition des ruminants domestiques, INRA Ed., 602-647

**Khan N.A., Peiqiang Y., Mubarak A., Cone J.W., Hendriks W.H., 2014.** DOI 10.1002/jsfa.6703

**Kristensen E.S., Moller P.D., Hvelplund T., 1982.** Acta Agr Scand. 32, 123-127

**Mertens, D.R., 1993.** In ASA-CSSA-SSSA, Forage Cell Wall Structure and Digestibility. Madison, USA.

**Ops F., Fortina R., Borreani G., Tabacco E., Lopez S., 2013.** J. Agric. Sci., 151, 740-753

**Peyrat J., Nozière P., Le Morvan A., Féraud A., Protin P.V., Baumont R., 2014.** Anim. Feed Sci. Technol., 196, 12-21

**Philippeau C., Landry J., Michalet-Doreau B., 2000.** J Sci Food Agric., 80, 404-408

**Savant D., Nozière P., 2013.** INRA. Prod. Anim., 26, 327-346