

INRA Prod. Anim.,
1999, 12 (5), 391-396

J. ANDRIEU¹, Y. BARRIERE²,
C. DEMARQUILLY¹

¹ INRA Unité de Recherches sur les
Herbivores, Theix,
63122 St Genès Champanelle

² INRA Station d'Amélioration des
Plantes Fourragères, 86660 Lusignan

e-mail : andrieu@clermont.inra.fr

Digestibilité et valeur énergétique des ensilages de maïs : le point sur les méthodes de prévision au laboratoire

Compte tenu des enjeux économiques qu'elle sous-tend, la prévision au laboratoire de la valeur alimentaire du maïs fourrage est l'objet depuis une dizaine d'années d'un débat d'idée intense aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'INRA. Ce texte a pour objectif de faire le point sur ce sujet en rappelant l'état actuel des propositions de l'INRA concernant cette prévision, soit à des fins de rationnement, soit à des fins de sélection.

La valeur énergétique nette des aliments des ruminants (exprimée en UFL et UFV) dépend très étroitement de leur digestibilité qui est généralement mesurée sur des moutons maintenus en cage individuelle à métabolisme. Dans le cas du maïs plante entière, la digestibilité est mesurée sur des moutons alimentés au voisinage de leur besoin d'entre-

tien et avec une complémentation adéquate en azote, en minéraux et en oligo-éléments.

Les modifications de digestibilité et de valeur énergétique entraînées par l'ensilage pouvant être considérées comme négligeables (du moins si, comme c'est généralement le cas, la récolte a lieu à une teneur en matière sèche supérieure à 25 %), il est possible d'extrapoler directement à l'ensilage les valeurs prédites sur un échantillon prélevé à la mise en silo (Andrieu 1985). Comme dans le cas de l'herbe, les prélèvements de maïs effectués à la mise en silo présentent des avantages bien connus : disponibilité des résultats avant l'ouverture du silo, pas de corrections, toujours délicates, des analyses pour les pertes de produits volatils durant le séchage à l'étuve. Ils sont donc à privilégier par rapport aux prélèvements effectués sur les ensilages.

La digestibilité et la valeur énergétique d'une culture de maïs donnée est la résultante de l'action d'une part de facteurs intrinsèque à la plante (stade de végétation, génotype) et d'autre part des conditions de milieu (lieu, année). On parle alors de valeur

Résumé

Ce texte a pour objectif de faire le point sur les méthodes actuellement disponibles en France pour évaluer au laboratoire la qualité nutritionnelle du maïs fourrage, tant sur le plan du rationnement que sur celui de la sélection. Pour évaluer, dans le cadre du rationnement, la valeur énergétique de la plante entière, les équations proposées à Nantes en 1996 par l'INRA-Theix et faisant intervenir la digestibilité enzymatique de la plante entière et sa teneur en matières azotées, sont les plus performantes actuellement, mais n'expliquent que 50 % de la variation totale de la digestibilité *in vivo* de la plante entière. La relation très étroite entre la digestibilité *in vivo* de la plante entière et sa teneur en parois indigestibles met en lumière l'importance de la qualité des parois dont l'évaluation au laboratoire, à partir de plusieurs critères (DINAG et DEPAR), est décrite. Moins précis que la digestibilité enzymatique de la plante entière pour prévoir sa digestibilité, ces nouveaux critères sont par contre intéressants notamment en sélection pour caractériser la qualité nutritionnelle des parois. Par ailleurs leur intérêt pour évaluer l'ingestibilité de l'ensilage de maïs est en cours d'étude à l'INRA.

phénotypique dont l'appréhension est essentielle pour le rationnement.

Evaluation pour le rationnement de la valeur énergétique de la plante entière (valeur phénotypique)

La digestibilité et la valeur énergétique de la plante entière de maïs à la mise en silo peuvent être prévues à partir de différentes méthodes de laboratoire. Parmi elles, la solubilité enzymatique permet de mesurer la quantité de matière sèche solubilisée après une digestion enzymatique réalisée tout d'abord par une protéase (pepsine) puis par un mélange de cellulases et d'hémicellulases, associées à une amylase (méthode Ensitac de Libramont) ou non (méthode Aufrère et Michalet-Doreau 1983). En moyenne, les valeurs de solubilité de la matière sèche obtenues avec la méthode Libramont Ensitac sont supérieures de 10 points à celles de la méthode "Aufrère". Des relations de passage entre les deux méthodes sont en cours de préparation.

La solubilité enzymatique est intéressante à plus d'un titre. Elle permet tout d'abord d'obtenir un classement des valeurs de digestibilité des variétés, classement qui reflète assez bien celui obtenu à partir des valeurs mesurées sur les moutons et qui est extrêmement proche entre les deux méthodes évoquées ci-dessus. Ensuite, la solubilité enzymatique est nettement plus précise que les critères morphologiques (grain) ou chimiques (amidon, constituants pariétaux) pour prévoir la valeur énergétique indispensable au rationnement. Les équations de prévision actuellement les plus satisfaisantes, et donc à utiliser, font intervenir la solubilité enzymatique associée à la teneur en matières azotées totales. Ce sont celles proposées par J. Andrieu et J. Aufrère (INRA Theix) lors du colloque organisé par l'AGPM en 1996 à Nantes. Le libellé de ces équations est le suivant :

$$\text{DMO} = 28,50 + 0,0732 \text{ MATo} + 0,5501 \text{ DCS} ;$$

$$\text{SYX} = \pm 1,91 ; r = 0,668 ; N = 254$$

$$\text{UFLo} = 11,38 + 0,1390 \text{ MATo} + 1,0609 \text{ DCS} ;$$

$$\text{SYX} = \pm 3,29 ; r = 0,707$$

$$\text{UFVo} = -9,12 + 0,1475 \text{ MATo} + 1,1992 \text{ DCS} ;$$

$$\text{SYX} = \pm 372 ; r = 0,703$$

avec :

DCS = solubilité enzymatique de la MS en %, méthode Aufrère

MATo = matières azotées totales, en g/kg de matière organique

DMO = digestibilité *in vivo* de la matière organique, en %

UFLo = valeur UFL pour 100 kg de matière organique

UFVo = valeur UFV pour 100 kg de matière organique

SYX = écart type résiduel ("précision")

Dans ces équations, les limites d'utilisation des variables explicatives sont les suivantes :

MATo : minimum 53, maximum 106

DCS : minimum 59,0 , maximum 74,7

Ces équations ont été établies à partir de mesures de digestibilité réalisées *in vivo* sur des maïs normaux (c'est-à-dire non porteurs de gènes brown midrib : bm) et dans le cadre des travaux du Club de digestibilité et de l'INRA-Theix (au total sur 254 échantillons). Elles ont été validées sur une dizaine d'échantillons supplémentaires, de digestibilité connue, mais non inclus dans le calcul des équations. Ces équations ont été également validées sur animaux (taurillons et vaches laitières) par le groupe de travail SEPROMA, AGPM, INRA-Lusignan (Brunschwig *et al* 1996) : ce sont les valeurs énergétiques prédites par ces équations qui se rapprochent le mieux de celles exprimées par les bovins.

Si les conditions de prélèvement (échantillon représentatif), de conditionnement (séchage à 80 °C pendant 48 heures) et de mise en œuvre de la méthode enzymatique sont satisfaisantes, ces équations constituent notamment pour les éleveurs une avancée significative par rapport à celles faisant intervenir les seuls critères chimiques. Il n'en demeure pas moins qu'elles ne sont pas parfaites puisqu'elles ne permettent d'expliquer, pour des raisons évoquées plus loin, que 50 % des variations de la digestibilité mesurée sur animaux. Compte tenu de cela, il apparaît nécessaire d'approfondir l'analyse des facteurs de variation de la valeur énergétique de la plante.

Qualité nutritionnelle des parois et critères d'évaluation

En moyenne, les parois végétales représentent au moment de l'ensilage un peu moins de 50 % de la matière sèche de la plante de maïs (environ 47 %), le reste correspondant aux constituants cytoplasmiques (glucides solubles, amidon, matières azotées totales...). L'analyse des constituants pariétaux par la méthode de Van Soest permet de distinguer chez les végétaux trois grandes fractions. Le NDF, qui est le résidu après une attaque au détergent neutre, permet de connaître la teneur en parois totales. La teneur en NDF du maïs varie entre 320 et 550 g/kg de matière sèche et représente la somme des teneurs en hémicellulose, cellulose et lignine. L'ADF, qui est le résidu après une attaque avec un détergent acide, représente la somme de la cellulose et de la lignine. Ce critère est l'équivalent de la teneur en cellulose brute de la méthode Weende, mais il lui est toujours un peu supérieur en valeur absolue (d'environ 2,4 points). Enfin l'ADL, qui permet d'estimer la teneur en lignine, varie de 15 à 45 g/kg de MS.

La digestibilité des parois (DNDF) est non seulement nettement plus faible (57 % en moyenne) que la digestibilité réelle des constituants cytoplasmiques (voisine de 100 %), mais surtout nettement plus variable (de 45 à 74 % pour 150 mesures). Ceci explique que la digestibilité *in vivo* de la matière organique de la plante de maïs (tableau 1) dépende étroitement, comme celle des plantes pérennes (Jarrige et Minson

Tableau 1. Valeurs moyennes de différents critères mesurés soit au laboratoire soit in vivo, et prévision, à partir de ces critères, de la digestibilité de la matière organique de la plante entière de maïs à l'état frais.

1a - Valeurs moyennes, plage de variation et écarts types (et) de 150 échantillons (dont 12 échantillons bm3)						
	sigle	unité	moyenne	mini	maxi	et
<i>Mesures au laboratoire :</i>						
- composition chimique						
matière sèche	MS	g/kg	287	183	409	52
matières azotées totales	MAT	g/kg de MS	78	52	99	9
amidon (Ewers)	AMI	<i>id</i>	235	29	388	83
glucides solubles	GLS	<i>id</i>	122	55	226	32
cellulose brute	CB	<i>id</i>	208	157	280	25
parois totales	NDF	<i>id</i>	467	365	575	40
ligno-cellulose	ADF	<i>id</i>	232	174	317	29
lignine	ADL	<i>id</i>	26	11	54	7
- solubilité enzymatique Aufrère						
matière sèche	DCS	%	67,6	58,5	79,8	4,0
DINAG (DCS, AMI, GLS)	DINAG	%	49,5	37,8	69,3	5,4
DEPAR (DCS, NDF)	DEPAR	%	30,7	16,0	51,9	6,3
<i>Mesures in vivo :</i>						
digestibilité de la MO	DMO	%	72,1	63,5	80,6	3,3
digestibilité des parois	DNDF	%	56,7	45,2	73,7	5,3
teneur en parois indigestibles	NDFI	g/kg de MS	202	123	279	31
1b - Prévision de la digestibilité de la matière organique ($Y = 72,1 \pm 3,3$) à partir d'un seul critère explicatif (régression simple) mesuré au laboratoire ou sur des animaux						
critères explicatifs	type	codage du critère	R ²	SYX		
MAT	au laboratoire	1	ns	/		
AMI	<i>id</i>	2	0,208	2,91		
GLS	<i>id</i>	3	0,119	3,07		
CB	<i>id</i>	4	0,482	2,36		
NDF	<i>id</i>	5	0,379	2,58		
ADF	<i>id</i>	6	0,519	2,27		
ADL	<i>id</i>	7	0,471	2,38		
DCS	<i>id</i>	8	0,659	1,91		
DINAG	<i>id</i>	9	0,273	2,79		
DEPAR	<i>id</i>	10	0,268	2,80		
DNDF	sur animaux	11	0,642	1,96		
NDFI	<i>id</i>	12	0,966	0,60		
1c - Prévision de la digestibilité de la matière organique à partir de plusieurs critères explicatifs (régression multiple) mesurés au laboratoire						
critères proposés	critères explicatifs		R ²	SYX		
MAT (1), AMI (2), CB (4)	2, 4		0,542	2,22		
NDF (5), ADF (6), ADL (7)	6, 7		0,556	2,19		
AMI (2), GLS (3), DCS (8)	2, 8		0,669	1,89		
NDF (5), DCS (8)	8		0,659	1,91		
AMI (2), GLS (3), DINAG (9)	2, 3, 9		0,665	1,91		
NDF (5), DEPAR (10)	5, 10		0,658	1,92		
SPIR :						
- STEPWISE	/		0,830	1,34		
- MPLS	/		0,870	1,17		
- MPLS avec cross validation	/		0,750	1,63		

Tableau 2. Prédiction à partir de différents critères mesurés au laboratoire de la digestibilité *in vivo* des parois de maïs à l'état frais.

Les relations ont été calculées sur 4 populations :				
P1 : sur l'ensemble des échantillons y compris 12 maïs bm3 soit 150 échantillons au total				
P2 : sur l'ensemble des échantillons moins les maïs bm3 soit 138 échantillons.				
P3 : sur les échantillons dont le taux de MS était 30 %, soit 66 échantillons dont 5 maïs bm3.				
P4 : sur les échantillons dont le taux de MS était 30 % et sans bm3, soit 61 échantillons.				
Valeur moyenne et écart type de la digestibilité <i>in vivo</i> des parois (DNDF) pour les 4 populations :				
	P1	P2	P3	P4
moyenne	56,7	56,6	55,8	55,7
écart type	5,3	4,9	4,3	3,9
Précision (écart type résiduel) des relations entre DNDF et différents critères de laboratoire				
	P1	P2	P3	P4
	(n=150)	(n=138)	(n=66)	(n=61)
Critères :				
MAT	5,11	4,14	4,74	ns
AMI	ns	ns	4,76	ns
GLS	ns	ns	ns	ns
CB	5,19	ns	ns	ns
NDF	ns	ns	ns	ns
ADF	5,11	ns	4,72	ns
ADL	4,68	4,21	4,34	ns
DCS	4,38	4,07	3,96	3,71
DEPAR	3,74	3,57	3,36	3,28
DINAG	3,94	3,82	3,29	3,31
SPIR :				
- STEPWISE	2,66		2,52	
- MPLS	2,51		2,14	

1964), de la teneur en parois indigestibles (NDFI en g/kg de MS) :

$DMO = 93,13 - 0,1038 \text{ NDFI}$; $R^2 = 0,97$;
 $SYX = \pm 0,60$; $n = 150$

Cette relation, qui est quasiment mathématique, est essentiellement évoquée ici pour montrer que la prédiction au laboratoire de la digestibilité de la matière organique de la plante entière passe par la mesure de sa teneur en NDF et par la prédiction de la digestibilité *in vivo* de ses parois. Malheureusement, dans le cas du maïs, et contrairement à ce qui se passe dans le cas des plantes fourragères pérennes, les relations entre DNDF et différents critères mesurés sur la plante entière (tableau 2) ne sont pas significatives (NDF) ou très imprécises (ADF, ADL, DCS). Par ailleurs, pour des questions de facilité de mise en œuvre et de coût, il est difficilement envisageable de préconiser, en plus de celles réalisées sur plante entière, de nouvelles analyses sur la fraction non-grain qui contient la majeure partie des parois de la plante. C'est pourquoi Argillier *et al* (1995) et Argillier et Barrière (1996) ont proposé le critère DINAG pour prévoir la digestibilité des parois au laboratoire. Ce critère représente la digestibilité de la partie non

amidon et non glucides solubles calculée de la manière suivante à partir de la solubilité enzymatique de la matière sèche de la plante entière :

$DINAG \% = 100 \times (DCS \% - \text{Amidon} \% - \text{Glucides sol.} \%) / (100 - \text{Amidon} \% - \text{Glucides sol.} \%)$

C. Demarquilly, considérant que la fraction non amidon non glucides solubles contient non seulement les parois mais aussi une part importante de constituants solubles très digestibles (comme les matières azotées), a proposé lors du colloque de Nantes (1996) un autre critère DEPAR qui représente la digestibilité enzymatique des parois totales calculée à partir de la teneur en NDF :

$DEPAR \% = 100 \times (DCS \% - (100 - NDF \%)) / NDF \%$

Cette deuxième proposition est d'ailleurs dans le prolongement de celle formulée par Struik (1983) et reprise par Dolstra et Medema (1990).

C'est la digestibilité enzymatique par la méthode Aufrère (DCS) qui a été en définitive retenue pour calculer les critères DINAG et DEPAR et cela pour des raisons notamment

de cohérence avec les équations proposées plus haut pour prévoir la digestibilité de la plante entière. En outre, la méthode Aufrère, si elle donne des valeurs absolues plus faibles que celles de la méthode Ensitac Libramont, permet d'obtenir des classements comparables entre hybrides.

Evaluation, pour la sélection, de la qualité nutritionnelle des parois

Les critères DINAG et DEPAR sont plus précis que les critères chimiques ou enzymatiques pour prévoir la digestibilité *in vivo* des parois et ce d'autant plus que la teneur en matière sèche de la population considérée est plus élevée (tableau 2). Par contre ils sont nettement moins précis que la DCS pour prévoir la digestibilité de la plante entière (tableau 1b). L'intérêt majeur de ces deux critères réside donc dans leurs propriétés statistiques particulièrement intéressantes en sélection (Barrière *et al* 1997).

En effet, ces critères sont indépendants des teneurs en parois (mesurées par le NDF par exemple), de même qu'ils sont indépendants de la teneur en amidon, ce qui n'est logiquement pas le cas du critère de digestibilité de la matière sèche des plantes entières. Le critère DINAG est plus précis selon les différents milieux que le critère DEPAR, avec des variances résiduelles (analyse de variance) environ deux fois plus faibles. De plus l'héritabilité du critère DINAG, qui est au moins égale à celle du rendement, est supérieure à l'héritabilité du critère DEPAR, avec possibilité de sélection sur les valeurs propres. Ces critères de type parois sont ainsi indispensables pour le sélectionneur qui doit conduire son travail sur deux types de systèmes génétiques indépendants, l'un gouvernant la teneur en grain, et l'autre gouvernant la digestibilité des parois. Comme les solubilités enzymatiques, les critères DINAG ou DEPAR sont faciles à mettre en œuvre dans les laboratoires d'analyse.

Les profils d'analyses (cendres, MAT, NDF, DCS, ou cendres, MAT, amidon, glucides solubles, DCS) permettent sans doute de caractériser au mieux la valeur nutritive du maïs, mais leur mise en œuvre à partir de méthodes de référence est trop longue et trop onéreuse pour être compatible notamment avec des programmes de sélection. C'est pourquoi des travaux ont été entrepris dans différents laboratoires de recherche (voir notamment Dardenne *et al* 1993, Andrieu et Aufrère 1996, Dardenne et Agnessens 1996) pour prévoir ces critères au laboratoire à partir de la spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR). Comme le montre les résultats obtenus à l'INRA-Theix (tableaux 2 et 3), la SPIR, qui est une méthode rapide et non destructrice des échantillons, permet de prévoir avec précision tous ces paramètres, à condition que soient respectées certaines conditions (préparation et conditionnement standardisés des échantillons, c'est-à-dire séchage à 80° pendant 48 heures suivi d'un broyage à la grille de 0,8 mm). Bien que les matières minérales n'absorbent pas dans le proche infrarouge, il est possible, grâce à des relations secondaires avec certains constituants de la matière organique (amidon, glucides solubles), de prévoir leur concentration d'une manière suffisamment précise à partir de l'infrarouge (tableau 3).

Mais les performances des animaux ingérant de l'ensilage de maïs dépendent aussi de son ingestibilité, c'est-à-dire de la quantité de matière sèche qui est ingérée par jour par un animal de caractéristiques données recevant à volonté cet ensilage correctement complété en azote et en minéraux. C'est donc un nouveau volet qui a été ouvert dès 1992 par l'INRA et qui doit maintenant être développé en terme de méthodes de prévision de l'ingestibilité au laboratoire. Dans ce cadre, de nouveaux éléments devraient être apportés sur l'aptitude comparée des critères DINAG et DEPAR à prévoir la valeur alimentaire du maïs.

Tableau 3. Prévision à partir de la SPIR de différents critères chimiques ou enzymatiques de la plante entière de maïs à l'état frais (J. Andrieu et M. Jestin, non publié).

Critère	N	moyenne	mini	maxi	MPLS avec cross-validation	
					R ²	SYX
cendres (g/kg MS)	302	48	32	80	0,760	3,8
MAT	302	74	49	99	0,930	2,6
amidon	302	238	29	404	0,950	18,3
glucides solubles	262	120	36	226	0,930	10,6
cellulose brute	302	208	157	280	0,840	9,2
NDF	302	471	385	575	0,770	16,9
DCS %	254	67,9	59,0	74,7	0,790	1,29
DINAG %	150	49,4	37,2	69,3	0,760	2,72
DEPAR %	150	30,5	11,2	51,9	0,690	3,65

Références

- Andrieu J., 1985. Composition et valeur alimentaire du maïs plante entière. Colloque Maïs Ensilage, Rennes, 29-30 mai 1985.
- Andrieu J., Aufrère J., 1996. Prévion à partir de différentes méthodes (physique, chimique et biologique) de la digestibilité et de la valeur énergétique de la plante de maïs à l'état frais. Colloque Maïs Ensilage, Nantes, 17-18 septembre 1996.
- Argillier O., Barrière Y., 1996. DINAG, une estimation de la qualité de la partie non grain du maïs ensilage sur des échantillons de plante entière. Colloque Maïs Ensilage, Nantes, 17-18 septembre 1996.
- Argillier O., Barrière Y., Hébert Y., 1995. Genetic variation and selection criteria for digestibility traits of forage maize. *Euphytica*, 82, 175-184.
- Aufrère J., Michalet-Doreau B., 1983. In vivo digestibility and prediction of digestibility of some by-products. Feeding value of by-products and their use by beef cattle. EEC Seminar. Gontrode, September 1983, 27-29.
- Barrière Y., Argillier O., Michalet-Doreau B., Hébert Y., Guingo E., Giauffret C., Emile J.C., 1997. Relevant traits, genetic variation and breeding strategies in early silage maize. *Agronomie*, 17, 395-411.
- Brunschwig P., Carpentier B., Haurez P., Paccard P., Augéard P., Joulie A., Jullien J.P., 1996. Valorisation par les jeunes bovins et les vaches laitières d'ensilages de maïs choisis pour leur digestibilité. Colloque Maïs Ensilage, Nantes 17-18 septembre 1996.
- Dardenne P., Agneessens R., 1996. Détermination de la valeur nutritive du maïs ensilage par spectromètre dans le proche infrarouge. Colloque Maïs Ensilage, Nantes, 17-18 septembre 1996.
- Dardenne P., Andrieu J., Barrière Y., Biston R., Demarquilly C., Femenias N., Lila M., Maupetit P., Ronsin T.H., 1993. Composition et valeur nutritive de la plante de maïs distribuée à l'état frais à des moutons. II. Prévion de la digestibilité. *Ann. Zootech.*, 42, 251-270.
- Dolstra O., Medema J.H., 1990. An effective screening method for improvement of cell wall digestibility in forage maize. Proc. 15th Eucarpia congress Maize sorghum, June 4-8, 1990, Baden, Austria, 258-270.
- Jarrige R., Minson D.J., 1964. Digestibilité des constituants du ray-grass anglais S24 et du dactyle S37, plus spécialement des constituants glucidiques. *Ann. Zootech.*, 13, 117-150.
- Struik P.C., 1983. Physiology of forage maize in relation to its production and quality. *Weded. Landbouwhogeschool Wageningen*, 83-3.

Abstract

Digestibility and energy value of maize silage : laboratory methods for prediction.

The aim of this paper is to evaluate the methods available at the present time in French laboratories that predict the nutritional quality of maize forage for feeding or selection. The equations suggested at the 1966 Nantes congress by INRA-Theix using pepsine cellulase digestibility associated to crude protein are at the present time the most precise for predicting the net energy value of the whole maize plant for feeding. However half of the total variation of the in vivo digestibility is not explained by these relations. The narrow relationship between in vivo organic matter digestibility and undigested cell wall contents illustrates the weight of

nutritional cell wall quality. The prediction of cell wall quality with the help of the DINAG and DEPAR criteria is described. In selection, these two criteria are very interesting for the prediction of in vivo cell wall digestibility, even though they are less precise than enzymatic dry matter digestibility for the prediction of in vivo organic matter of the whole maize plant. At the present time, the interest of these criteria for the prediction of digestibility is being investigated at INRA.

ANDRIEU J., BARRIERE Y., DEMARQUILLY C., 1999. Digestibilité et valeur énergétique des ensilages de maïs : le point sur les méthodes de prévision au laboratoire. *INRA Prod. Anim.*, 12, 391-396.