

Digestibilité et ingestibilité du maïs fourrage : facteurs de variation et prévision

J. Andrieu, R. Baumont

Compte tenu des enjeux socio-économiques qu'il sous-tend, l'ensilage de maïs est un aliment stratégiquement important. Il apparaît donc nécessaire d'appréhender au mieux sa valeur alimentaire, notamment sa digestibilité et son ingestibilité, dont les facteurs explicatifs sont complexes.

RESUME

La digestibilité des ensilages de maïs est actuellement bien connue. Cependant, de nouveaux travaux seraient nécessaires pour préciser l'influence des conditions de milieu durant la phase allant de la floraison au stade vitreux du grain, et pour améliorer la précision de la prévision de la digestibilité des parois.

L'influence des caractéristiques de la plante sur l'ingestibilité de l'ensilage est nettement moins avancée. Il existe des relations significatives entre l'ingestibilité des ensilages de maïs et leur digestibilité et vitesse de dégradation, mais il est difficile de hiérarchiser l'effet de ces facteurs. En outre, la validation des différentes équations de prévision d'ingestibilité des ensilages, actuellement disponibles, impliquerait de nouvelles mesures standardisées.

MOTS CLES

Digestibilité, ensilage, fourrage, ingestibilité, maïs, méthode d'estimation, valeur alimentaire, prévision.

KEY-WORDS

Digestibility, estimation method, feeding value, forage, maize, prediction, silage, voluntary intake.

AUTEURS

INRA, Theix, F-63122 Saint-Genès-Champanelle ; andrieu@clermont.inra.fr

La valeur alimentaire d'un fourrage peut être définie par la quantité d'éléments nutritifs qu'il apporte lorsqu'il est distribué à volonté aux animaux. Elle va donc dépendre en premier lieu de la valeur nutritive de ce fourrage, et plus particulièrement de la digestibilité de sa matière organique (DMO) qui est le principal facteur de variation de la valeur énergétique. Mais la valeur alimentaire d'un fourrage dépend au moins autant de son ingestibilité, c'est-à-dire de la quantité de matière sèche volontairement ingérée par un animal donné. Suite aux études très complètes réalisées en France de 1987 à 1995 sur les facteurs de variation de la digestibilité du maïs fourrage, des études ont donc été engagées dès 1992 en France sur le thème de l'ingestibilité des ensilages de maïs.

Digestibilité à l'état non fermenté

Pour des raisons de facilité, l'étude des facteurs de variation de la digestibilité des ensilages a été souvent abordée, comme ce fut le cas en France pour les essais réalisés de 1987 à 1995 par le " Club Digestibilité " (action concertée INRA, ITCF, AGPM, sélectionneurs de maïs) et l'INRA de Theix, au travers de ceux de la plante de maïs à l'état frais (non fermentée). On sait en effet que la DMO des ensilages de maïs récoltés à plus de 25% de matière sèche (MS) est égale à celle du maïs à la mise en silo (Andrieu, 1985).

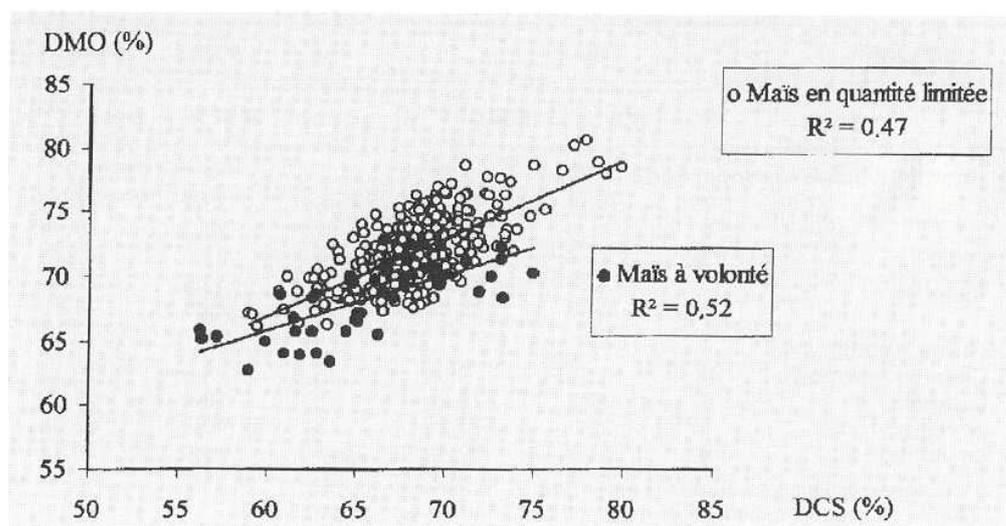
1. Principaux facteurs de variation de la digestibilité de la plante entière

Dans nos premiers essais effectués de 1964 à 1971 sur des moutons alimentés à volonté, la DMO a été de $71,5 \pm 2,2\%$ pour les 20 maïs étudiés (Andrieu, 1985). Pour un maïs donné, elle n'a pas varié significativement avec le stade de végétation entre les stades laiteux et vitreux du grain. Cette constance de la digestibilité de la plante entière a été retrouvée dans les autres études réalisées *in vivo* sur ce sujet (Harris, 1965 ; Noller *et al.*, 1963 ; Davis et Bowden, 1969). Comme l'a montré Demarquilly (1969), l'augmentation dans la plante entière de la part de l'épi, dont la digestibilité est élevée et pratiquement constante (de l'ordre de 85%), compense la diminution de la digestibilité du reste de la plante qui, dans le même laps de temps, passe de 70 à 60% environ.

En revanche, dans des essais plus récents effectués en France (7 lieux, 2 années) dans le cadre du " Club Digestibilité " sur des moutons alimentés en quantité limitée, la DMO, si elle a été en moyenne du même ordre de grandeur (71,7%), a, tous essais confondus, augmenté lentement mais significativement avec le stade de végétation pour atteindre un maximum à une teneur en matière sèche de 35%. Cette augmentation, qui n'avait pas été observée dans les premiers essais est sans doute due en partie à des interactions digestives négatives (entre les fractions amidon et parois) moins importantes lorsque la plante est distribuée en quantité limitée. Cela est illustré par la comparaison globale des deux populations de données (mesures en quantité limitée ou à volonté) exprimées en fonction d'un critère de prévision qui est indépendant des phénomènes d'interaction (figure 1).

Figure 1 : Influence du niveau d'alimentation sur la relation entre la DMO du maïs en vert et la digestibilité enzymatique de la matière sèche (DCS ; Andrieu, non publié).

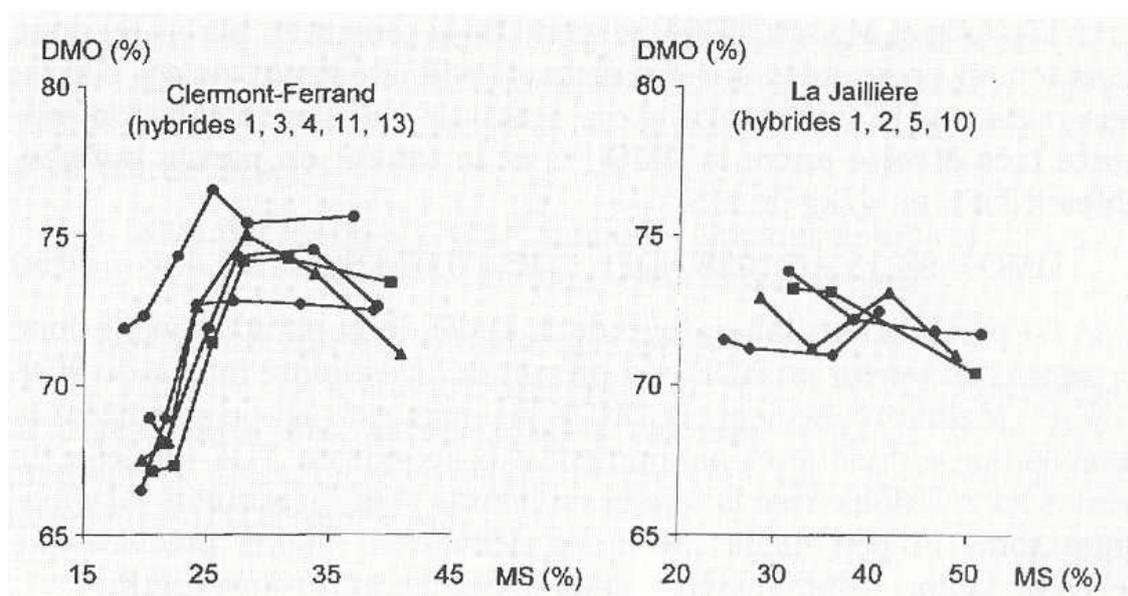
Figure 1 : Influence of the feeding level on the relationship between organic matter digestibility (DMO) of fresh maize and enzymatic digestibility of dry matter (DCS ; Andrieu, unpublished).



Une analyse plus approfondie des données récentes montre cependant que l'évolution de la DMO avec le stade de végétation a été différente selon les conditions de végétation à partir de la floraison (Andrieu *et al.*, 1993) : lorsque ces dernières ont été très favorables à la formation du grain (températures et eau non limitantes), comme ce fut le cas dans les sites de Clermont-Ferrand, Lusignan et Toulouse, le rapport glucides cytoplasmiques (i.e. glucides solubles + amidon) / parois, ainsi que la digestibilité ont augmenté nettement jusqu'à une teneur en matière sèche de 35% (figure 2). Par contre en conditions moins favorables (températures insuffisantes, sécheresse), comme ce fut le cas à Rennes, le Pin et la Jaillière, le rapport glucides cytoplasmiques / parois a beaucoup moins augmenté et la digestibilité n'a pas augmenté avec le stade de végétation.

Figure 2 : Evolution, en fonction de la teneur en matière sèche (MS), de la digestibilité de la matière organique (DMO) des maïs étudiés en vert en 1987 dans 2 lieux différents (Andrieu *et al.*, 1993).

*Figure 2 : Changes in organic matter digestibility (DMO) of fresh maize according to DM content (MS) in 1987 in two different locations (Andrieu *et al.*, 1993).*



A stades comparables, la digestibilité peut varier d'un maïs à un autre : pour les 15 hybrides normaux étudiés en 1987 et 1988, elle a varié de 67 à 78%. Dans ces essais, les variations de digestibilité observées entre hybrides cultivés la même année dans un lieu donné sont restées faibles et rarement significatives. Les différences significatives observées parfois ne l'ont pas été forcément dans un autre lieu ou pour une autre année. Enfin, ces différences ont été du même ordre de grandeur que celles observées entre lieux ou années pour un même hybride (tableau 1).

2. Prédiction au laboratoire de la digestibilité de la plante entière

Les parois totales que l'on assimilera à la teneur en NDF (méthode de Van Soest) représentent en moyenne 47% de la matière sèche de la plante à la mise en silo. Le reste de la matière sèche correspond aux constituants cytoplasmiques dont les principaux sont les matières azotées totales, les glucides solubles et l'amidon.

Si la digestibilité des constituants cytoplasmiques est élevée (digestibilité réelle voisine de 100%), celle des parois est nettement plus faible (en moyenne 57%) et surtout nettement plus variable d'un maïs à un autre (de 47 à 74% ; Andrieu *et al.*, 1999). Cela explique que la DMO de la plante de maïs, comme celle des autres plantes fourragères (Jarrige et Minson, 1964), dépend de la teneur en parois (et donc de sa teneur en grain) et surtout de la digestibilité *in vivo* de ces parois. Cela nous a permis (Andrieu *et al.*, 1993) de calculer la relation suivante très étroite entre la DMO (%) et la teneur en parois indigestibles (NDFI, en g/kg de MS) :

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

Tableau 1 : Digestibilité moyenne de la matière organique (DMO) des hybrides de maïs étudiés à Clermont-Ferrand et de l'hybride 1 étudié dans différents lieux en 1987 et 1988 (Andrieu *et al.*, résultats non publiés).

*Table 1 : Mean organic matter digestibility (DMO) of hybrid maize types studied in Clermont-Ferrand and of the 1 hybrid studied in different places in 1987 and 1988 (Andrieu *et al.*, unpublished).*

	1987			1988		
	n*	MS**(%)	DMO***(%)	n*	MS**(%)	DMO***(%)
Hybrides étudiés à Clermont-Ferrand :						
1	4	31,4	73,3a	5	29,8	70,1a
3	4	31,3	73,3a	4	30,2	69,3a
4	3	34,3	73,2a	4	31,5	72,2a
11	3	32,8	72,7a	4	31,8	70,8a
13	3	30,3	75,8b	3	29,9	74,9b
Hybride 1 étudié à :						
Clermont-Ferrand	4	31,4	73,3a	5	29,8	70,1a
Lusignan	3	31,7	76,2b	2	29,0	73,2b
Le Pin-au-Haras	4	30,1	72,2a	5	28,8	69,9a
La Jaillière	4	41,8	72,4a	4	34,0	70,1a

* n : nombre d'échantillons étudiés (1 échantillon = 1 semaine de mesure)
 ** MS (%) : teneur en matière sèche moyenne des différents échantillons étudiés
 *** les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes à P = 0,05

Tableau 2 : Coefficient de corrélation (r) et écart-type résiduel (Syx) des relations entre la digestibilité *in vivo* des parois du maïs fourrage à l'état frais et différents critères de laboratoire (Andrieu *et al.*, 1999). Les relations ont été calculées sur 150 échantillons (dont 12 maïs bm3) pour lesquels la digestibilité des parois a été en moyenne de 56,7 5,3%.

*Table 2 : Correlations coefficient (r) and residual standard deviation (Syx) of the relationships between the in vivo digestibility of fresh forage maize cell-walls and various laboratory criteria (Andrieu *et al.*, 1999) ; the relationships were calculated on 150 samples (of which 12 maize plants of the bm3 type) with an average cell-wall digestibility of 56.7 5.3%.*

Critères	r	Syx (%)
MAT	0,27	5,1
Amidon	-	non significatif
Glucides solubles	-	non significatif
Cellulose brute	0,21	5,2
NDF	-	non significatif
ADF	0,27	5,1
ADL	0,47	4,7
DCS	0,56	4,4
DEPAR	0,71	3,7
DINAG	0,67	3,9
SPIR		
Stepwise		2,7
MPLS		2,5

La prévision au laboratoire de la DMO de la plante revient donc à mesurer la teneur en NDF et à prévoir la digestibilité *in vivo* du NDF (DNDF). Malheureusement, la DNDF du maïs est peu ou pas liée à la composition chimique et notamment à la teneur en NDF (tableau 2). Seules les relations avec la teneur en lignine et la digestibilité enzymatique sont un peu meilleures mais demeurent moins précises que celles de la spectrophotométrie dans le proche infrarouge (SPIRE).

Il en résulte que les critères chimiques, pris un à un, sont en moyenne moins précis que la digestibilité enzymatique et surtout que la SPIR pour prévoir au laboratoire la DMO *in vivo* de la plante entière. Pour obtenir une prévision satisfaisante, il a été nécessaire d'associer plusieurs critères dans les 2 équations (M1 et M4) qui ont été proposées par Andrieu et Aufrère (1996) à partir des travaux du " Club Digestibilité " et de l'INRA de Theix (tableau 3).

Suite aux études de validation réalisées sur animaux par le groupe de travail SEPROMA, AGPM, et INRA (Brunschwig *et al.*, 1996), c'est en fin de compte le modèle M4 qui a été retenu pour caractériser la qualité des hybrides inscrits au catalogue français.

Tableau 3 : Equations de prévision de la digestibilité *in vivo* de la matière organique (DMO, %) du maïs fourrage à l'état frais (Andrieu et Aufrère, 1996). Origine des données : 220 échantillons du Club digestibilité et 34 échantillons de l'INRA de Theix dont la teneur en matière sèche a été en moyenne de 2,94 5,9%.

Table 3 : Equations predicting the in vivo organic matter digestibility (DMO, %) of fresh forage maize (Andrieu and Aufrère, 1996). Origin of data : 220 samples from the Digestibility Club and 34 samples from the INRA Station at Theix, with an average DM content of 2.4 5.9%.

Limites de validité		Moyenne	Min.	Max.
Critères de prévision				
Matières azotées totales (MATo, en g/kg MO)		79	53	106
Cellulose brute (CBo, en g/kg MO)		219	163	300
Digestibilité enzymatique de la MS (DCS, en %) (AUFRERE et MICHALET-DOREAU, 1983)		67,9	59,0	74,7
Equations			Syx	R
M1	DMO = 79,4 + 0,0652 MATo – 0,0591 CBo		± 1,98	0,634
M4	DMO = 28,5 + 0,0732 MATo + 0,5501 DCS		± 1,91	0,668

3. Qualité nutritionnelle des parois

Nous avons vu que si la digestibilité *in vivo* des parois est un aspect essentiel, elle demeure cependant difficile à prévoir même à partir de la digestibilité enzymatique de la plante entière. C'est pourquoi l'INRA a proposé (Andrieu *et al.*, 1999) deux nouveaux critères étroitement liés entre eux, qui permettent de mieux prévoir la digestibilité *in vivo* des parois (tableau 2).

Le critère DINAG (Argillier et Barrière, 1996) représente la digestibilité de la partie non amidon non glucides solubles calculée à partir de la digestibilité enzymatique de la matière sèche de la plante entière (DCS en % ; méthode Aufrère et Michalet-Doreau, 1983) et des teneurs en amidon et en glucides solubles (en % de la MS de la plante entière) :

$$\text{DINAG (\%)} = 100 \times (\text{DCS} - \text{amidon} - \text{glucides solubles}) / (100 - \text{amidon} - \text{glucides solubles})$$

Le critère DEPAR, proposé par Demarquilly à Nantes en 1996, et qui s'inspire notamment d'une étude de Struik (1983), représente la digestibilité des parois totales calculée à partir de la même méthode de digestibilité enzymatique que plus haut (DCS en %) et de la teneur en NDF (en % MS) :

$$\text{DEPAR (\%)} = 100 \times [\text{DCS} - (100 - \text{NDF})] / \text{NDF}$$

Si le critère DINAG est plus approprié à la sélection (Barriere et Emile, cet ouvrage), le critère DEPAR a une signification nutritionnelle plus affirmée puisqu'il repose sur la distinction entre la fraction pariétale peu digestible (NDF) et la fraction cytoplasmique (notamment matières azotées totales, glucides solubles, amidon) très digestible. Intéressants pour caractériser la qualité nutritionnelle des parois, ces deux critères sont à l'inverse moins précis que la DCS pour prévoir la DMO de la plante entière.

Ingestibilité

1. Rappels

Pour un animal donné, la quantité volontairement ingérée de fourrage dépend des caractéristiques du fourrage, qui déterminent son ingestibilité, et des caractéristiques de l'animal, qui déterminent la capacité d'ingestion de ce dernier. Le contrôle des quantités ingérées intègre un mécanisme à court terme qui vise à maintenir l'animal en l'état (homéostasie) et un mécanisme à long terme qui dépend des besoins nutritionnels et des réserves corporelles. Si la capacité d'ingestion est principalement déterminée par les mécanismes de contrôle à long terme, l'ingestibilité dépend en revanche essentiellement de mécanismes à court terme. Le contrôle à court terme intègre le processus de rassasiement dans lequel interviennent des signaux physiques (encombrement du rumen), des signaux chimiques (produits terminaux de la digestion dans le rumen) et la motivation à ingérer qui est plus ou moins stimulée par les qualités sensorielles du fourrage (palatabilité ; Baumont *et al.*, 1997).

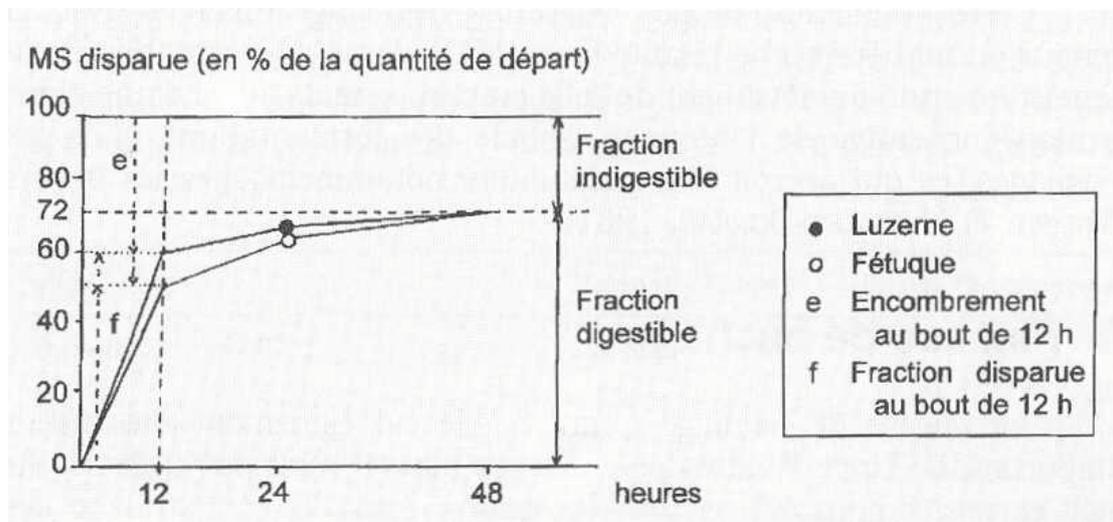
La régulation de l'ingestion des fourrages non broyés et distribués avec peu d'aliments concentrés est avant tout liée à l'état d'encombrement du rumen. En effet, lorsque le fourrage arrive dans le rumen, il y subit une véritable séquestration car il ne peut le quitter qu'après avoir été réduit en très fines particules (1 à 2 mm chez les ovins et 2-4 mm chez les bovins) sous l'action des micro-organismes du rumen et de la mastication. Le rumen étant un réservoir de capacité limitée, l'ingestibilité va donc varier en sens inverse de l'état d'encombrement du rumen entre deux distributions successives de repas. Cet état d'encombrement va augmenter d'un fourrage à un autre avec le temps de séjour de la matière sèche de ces fourrages dans le rumen et diminue donc avec leur vitesse de dégradation dans le rumen. La technique des sachets de nylon permet de mesurer la vitesse de dégradation des fourrages dans le rumen. Elle consiste à enfermer de petits échantillons de fourrage soit frais soit secs (environ 3 g de matière sèche) dans des sachets de nylon de mailles très fines (50 microns) qui sont déposés dans le rumen pendant des temps variables (2, 4, 8, 12, 24 heures, etc.) et à mesurer la quantité disparue, c'est-à-dire considérée comme " digérée ". Les cinétiques, ainsi mesurées, de la matière sèche et de ses principaux constituants ont permis de définir un critère synthétique qui est la dégradabilité théorique pour un taux de sortie des particules du rumen fixé à 6% par heure (DT6).

Les constituants cytoplasmiques étant dégradés beaucoup plus vite dans le rumen que les parois, la vitesse de dégradation des plantes fourragères va donc dépendre du rapport entre constituants cytoplasmiques et constituants pariétaux. Ensuite, pour un rapport donné, la vitesse de dégradation du fourrage va dépendre de la vitesse de dégradation des parois, elle-même fonction de leur degré de lignification. Dans ces conditions, la digestibilité et l'ingestibilité des fourrages (via notamment la vitesse de dégradation) vont varier avec les mêmes facteurs : âge, composition morphologique, degré de lignification des tissus, mais les lois de réponse à ces facteurs concerneront des temps courts (intervalle de temps entre 2 repas successifs soit 8-12 heures) pour l'ingestibilité et des temps longs (temps de séjour moyen dans l'ensemble du tube digestif soit environ 48 heures) pour la digestibilité (Demarquilly et Chenost, 1969).

L'ingestibilité des plantes fourragères classiques varie donc dans le même sens que leur digestibilité, mais à même digestibilité, il existe des différences importantes d'ingestibilité, notamment selon la nature botanique des fourrages (revue de Jarrige *et al.*, 1974). Ainsi, à même digestibilité, les légumineuses sont nettement plus ingestibles que les graminées en raison de leur plus grande vitesse de dégradation sur des temps courts. C'est ce qu'illustre l'exemple (figure 3) d'une luzerne et d'une fétuque élevée ayant une même digestibilité de la matière sèche (72%) et dont les pouvoirs d'encombrement au bout de 12 h (quantité de matière sèche non dégradée dans le rumen) sont respectivement de 36% et 47%.

Figure 3 : Cinétique de la digestion dans le rumen d'une luzerne et d'une fétuque de même digestibilité *in vivo* (72% ; d'après Weiss et Demarquilly, 1970).

*Figure 3 : Digestion kinetics of a lucerne feed and a fescue feed of equal *in vivo* digestibility (72%) in the rumen (after Weiss and Demarquilly, 1970).*



2. Principaux facteurs de variation de l'ingestibilité des ensilages de maïs

Le comportement alimentaire des ovins consommant de l'ensilage de maïs étant différent de celui des bovins, nous n'aborderons ici que le cas des bovins principaux consommateurs d'ensilage de maïs.

* Teneur en matière sèche

De nombreux auteurs, comme notamment Malterre (1976) et Coppock et Stone (1968), ont constaté dans leurs revues que l'ingestibilité chez les bovins des ensilages de maïs augmentait avec leur teneur en matière sèche, jusqu'à une teneur d'environ 35% (stade vitreux du grain). Dans une synthèse de 19 essais sur bovins à l'engrais, Malterre a montré que la quantité d'ensilage de maïs ingérée augmentait de 0,2 kg MS/100 kg de poids vif quand la teneur en matière sèche passe de 20 à 35%. De même, les résultats de 10 essais sur taurillons (Raymond *et al.*, 1986, tableau 4) montrent qu'entre 25 et 35% MS, une augmentation de teneur en matière sèche de 5 points se traduit en moyenne par une augmentation de la teneur en grain de 5,7% et une augmentation de la quantité ingérée de matière sèche d'ensilage de 4% pour des animaux à l'engrais, puis n'évolue plus voir diminue.

Tableau 4 : Influence d'une augmentation de la teneur en MS de 5 points sur la teneur en grain et la quantité de MS d'ensilage de maïs ingérée par des taurillons (en % du témoin, d'après Raymond *et al.*, 1986).

*Table 4 : Influence of an increase by 5 points of the DM content on the grain contents and the amount of maize silage dry matter ingested by young bulls (% of control, after Raymond *et al.*, 1986).*

Teneur en MS du témoin	% de grains	Quantité MS ingérée
< à 30% (7essais)	+ 6,6	+ 4,9
> à 30% (3 essais)	+ 3,6	+ 2,8
Total (10 essais)	+ 5,7	+ 4,0

L'influence de la teneur en matière sèche, et donc du stade de récolte, est nettement plus élevée chez la vache laitière. Ainsi, pour des maïs normaux, l'utilisation du logiciel INRAtion montre qu'une vache de 600 kg, produisant 25 kg de lait et correctement complétementée, consomme respectivement 12,0 et 15,3 kg MS d'ensilage suivant que la teneur en matière sèche est de 25 ou de 35%, soit un accroissement de 28%.

Cette augmentation des quantités d'ensilage ingérées avec la teneur en matière sèche résulte sans doute d'une augmentation de la teneur en grain au détriment de celle en parois, mais aussi d'une diminution corrélative de l'intensité globale des fermentations dans les ensilages, ce qui accroît leur palatabilité notamment chez les bovins (Dulphy et Michalet-Doreau, 1981).

* Finesse de hachage

La finesse de hachage quant à elle est également un facteur important de l'ingestibilité des ensilages mais il n'est pas utile qu'elle soit excessive pour éclater tous les grains. Ainsi, la comparaison des ensilages simplement hachés aux mêmes ensilages passés dans un éclateur, pour améliorer le conditionnement du grain, n'a pas augmenté la quantité d'ensilage ingérée d'animaux à l'engrais quand le hachage était normal (longueur de brins de 6 mm) ou très peu et de manière non significative, quand le hachage était insuffisant (13 mm ; Raymond, 1985). Les résultats de De Brabender *et al.* (1990) montrent l'intérêt d'un hachage normal du maïs (5 mm) par comparaison à un hachage insuffisant (16 mm) sur les quantités d'ensilage ingérées par les vaches laitières (tableau 5). D'après les essais réalisés par l'EDE de la Vendée et rapportés par Cabon (1987), des réglages théoriques de 5 mm, ou de 7 à 9 mm avec un éclateur ou une grille, permettent d'obtenir une finesse de hachage optimum (1% de particules supérieures ou égales à 1 mm et 5 à 10% de particules comprises entre 10 et 20 mm).

Tableau 5 : Influence de la finesse théorique de hachage de l'ensilage de maïs sur la quantité ingérée par les vaches laitières (d'après De Brabender *et al.*, 1990).

*Table 5 : Influence of the theoretical fineness of chopping of maize silage on the amount ingested by dairy cows (after De Brabender *et al.*, 1990).*

Finesse de hachage (mm)	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
	16	5	16	5	16	5
MS (%)	35,0	34,6	26,8	27,1	29,2	29,8
MS ingérée (kg/jour)	16,1*	17,1*	13,5 ns	13,4 ns	13,3*	14,8*

* significatif à P 0,05 ; ns : non significatif

* Digestibilité

A même teneur en matière sèche et à même finesse de hachage, l'ingestibilité des ensilages de maïs varie dans le même sens que leur digestibilité. Cela a été montré, chez la vache laitière (Rémond et Journet, 1977) comme chez les animaux à l'engrais (Raymond *et al.*, 1986), dans des comparaisons entre maïs récoltés à stades comparables mais après avoir été soumis à des conditions de végétation (stress hydrique, peuplement) qui ont fait varier fortement le rapport grain/parois et donc leur digestibilité.

Dans des études plus récentes, la relation entre ingestibilité et digestibilité a été précisée au travers de l'effet hybride. Ainsi, dans 6 essais réalisés sur des taurillons recevant des maïs normaux ou porteurs du gène *bm3*, Barriere *et al.* (1985, tableau 6) ont montré que les hybrides *Bm3* étaient mieux ingérés (en moyenne de 7,7%) que leurs homologues normaux, et cela à même teneur en matière sèche et en grain. Par ailleurs, dans une étude réalisée en carrés latins à l'INRA de Theix (Andrieu *et al.*, 1997) sur 15 hybrides cultivés (à raison de 3 à 4 hybrides par an) dans un même lieu puis récoltés et conservés dans des conditions comparables (teneur en matière sèche, finesse de hachage), la quantité d'ensilage ingérée (après correction des variations de capacité d'ingestion entre années) a été élevée et en moyenne de 17,5 0,7 kg MS/jour pour des vaches laitières de 620 kg produisant 26 kg de lait et recevant une complémentation comparable en nature et en quantité (19% de la ration). Une année donnée, et cela durant chacune des 4 années de l'étude, nous avons observé entre hybrides des différences significatives d'ingestibilité qui ont pu atteindre 9%. Si, comme dans le cas des plantes fourragères classiques, nous avons pu mettre en évidence une relation significative entre l'ingestibilité des

ensilages étudiés (tous essais confondus, après correction pour les différences de capacité d'ingestion entre années) et leur digestibilité ($r = +0,629$; $Syx = 0,54$ kg MS/jour), d'autres facteurs interviennent puisque la digestibilité n'explique ici que 36% de la variation totale (Andrieu, non publié).

Tableau 6 : Influence du gène *bm3* sur la digestibilité (moutons) de l'ensilage de maïs et la quantité ingérée de MS d'ensilage par des taurillons à même niveau de complémentation (1 kg de MS de tourteau de soja ; moyenne de 6 essais ; d'après Barriere *et al.*, 1985).

*Table 6 : Influence of the *bm3* gene on the digestibility (by sheep) of maize silage and on the amount of silage DM ingested by young bulls with the same level of complementation (1 kg DM of soybean cake ; mean of 6 trials ; after Barriere *et al.*, 1985).*

Maïs	Normal	bm3	Ecarts (bm3/normal)
Teneur (%) - en MS	36,2	35,1	
- en grain	44,1	42,2	
Digestibilité MO (%)	71,6	73,2	+ 1,6 (+ 2,2%)
Consommation d'ensilage de maïs (kg/jour/animal)	7,38	7,95	+ 0,57 (+ 7,7%)

* Vitesse de dégradation

Comme l'ont observé Valentin *et al.* (1999) sur 2 hybrides et nous mêmes dans les essais évoqués plus haut (Andrieu, non publié), il est possible de relier les différences d'ingestibilité entre hybrides à celles de leur vitesse de dégradation. Cependant, dans notre étude, la relation entre ingestibilité et vitesse de dégradation de la matière sèche (DT6MS) n'a été seulement qu'un peu plus précise ($r = +0,645$; $Syx = 0,53$ kg MS/jour) que celle obtenue avec la digestibilité et n'a donc expliqué que 42% de la variation totale de l'ingestibilité. Enfin, à même digestibilité, la prise en compte de la DT6MS n'a pas permis d'améliorer significativement la prévision de l'ingestibilité. Cependant, ces résultats ne sont pas entièrement interprétés et la DT6MS n'est peut être pas le critère le plus pertinent pour caractériser l'état d'encombrement du rumen.

3. Méthodes de prévision de l'ingestibilité

A la différence des autres plantes fourragères, il n'existait pas jusqu'ici de méthodes simples de laboratoire pour prévoir l'ingestibilité des ensilages de maïs. En 1999, Baumont *et al.* ont proposé (tableau 7), à partir des ensilages types des tables INRA (1988), des équations reliant l'ingestibilité, et donc la valeur d'encombrement des ensilages de maïs, à la digestibilité de la matière organique associée ou non à la teneur en matière sèche (module Prevalim d'INRAtion).

Tableau 7 : Equations de prévision de l'ingestibilité des ensilages de maïs chez les ovins et les bovins (Baumont *et al.*, Prevalim de INRAtion, 1999).

*Table 7 : Equations for the prediction of maize silage ingestibility by sheep and by cattle (Baumont *et al.*, Prevalim from INRAtion, 1999).*

	Ingestibilité (g MS/kg P ^{0,75})	Valeur d'encombrement (UE/kg MS)	Equations*
Ovins	QIM	UEM = 75 / QIM	QIM = - 1701 + 48,92 DMO - 0,34 DMO ²
Vaches laitières	QIL	UEL = 140 / QIL	QIL = - 76,80 + 2,08 DMO + 1,82 MS
Bovins en croissance et vaches allaitantes	QIB	UEB = 95 / QIB	QIB = - 45,49 + 1,34 DMO + 1,15 MS

* DMO : digestibilité de la matière organique (%) ; MS : teneur en mat. sèche (%) corrigée pour les pertes de produits volatils

Simultanément, l'ITCF a proposé un modèle de prévision reliant l'ingestibilité des ensilages de maïs à la teneur en cellulose brute de la fraction non grain de la matière organique. Si dans certains cas les valeurs UE (Unité d'Encombrement) prévues par les équations de PrevAlim sont en bonne adéquation avec les quantités ingérées mesurées chez des vaches de réforme à viande par Agabriel *et al.*, elles sous-estiment en revanche d'environ 10% les quantités ingérées obtenues dans deux études récentes sur vaches laitières (Andrieu *et al.*, 1997 ; Dubin *et al.*, 1998). L'analyse de cette discordance est en cours afin d'en préciser l'origine : procède-t-elle d'une surestimation du taux de substitution fourrage/concentré pour des rations riches en matières azotées (Faverdin *et al.*, 1998) ou d'une surestimation de la valeur UE du fourrage ?

Conclusion

L'ingestibilité du maïs est un facteur de la valeur alimentaire aussi important que la digestibilité, mais ses facteurs explicatifs sont moins bien connus car à la fois moins bien étudiés et plus complexes que ceux de la digestibilité.

De nouveaux travaux sont nécessaires pour mieux appréhender la valeur alimentaire des ensilages de maïs. Sur le plan de la valeur énergétique, ces nouvelles études devraient viser la mise au point de critères de laboratoire mieux reliés à la digestibilité *in vivo* des parois. En terme d'ingestibilité, elle devraient revêtir un double aspect : mécanique pour mieux appréhender l'importance respective des mécanismes complexes mis en jeu, et appliqué (mesures standardisées) pour prévoir l'ingestibilité des ensilages de maïs dans les conditions de la pratique (valeur phénotypique). Ce sont des mécanismes de régulation physique mais également métabolique qui devront sans doute être pris en compte pour expliquer et prévoir les variations d'ingestibilité des ensilages de maïs dans les conditions de la pratique. De nouvelles études devraient également préciser l'impact des variations de valeur alimentaire des ensilages de maïs sur leur utilisation par les animaux non seulement en terme d'efficacité alimentaire mais aussi de qualité des produits animaux.

Travail présenté aux Journées d'information de l'A.F.P.F.
"Fourrages annuels et environnement",
les 28 et 29 mars 2000.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andrieu J. (1985) : "Composition et valeur alimentaire du maïs plante entière", *Colloque maïs fourrage*, Rennes, 29-30 mai 1985.
- Andrieu J., Aufrère J. (1996) : "Prévision 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 sept. 1996.
- Andrieu J., Demarquilly C., Dardenne P., Barriere Y., Lila M., Maupetit P., Riviere F., Femenias N. (1993) : "Composition and nutritive value of whole maize plants fed fresh to sheep. 1. Factors of variation", *Ann. Zootech.*, 42, 221-249.
- Andrieu J., Rouel J., Perry C., Bony J. (1997) : "Influence de l'hybride sur l'ingestibilité chez la vache laitière des ensilages de maïs plantes entières", *Renc. Rech. Ruminants* 1997, 4, 98.
- 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.
- Argillier O., Barriere 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 sept. 1996.
- 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, Sept. 1983, 27-29.
- Barriere Y., Gallois A., Huguet L., Traineau R., Malterre C., Bertin G., Micol D., Hoden A., Journet M., Mourguet A. (1985) : "Le maïs brown midrib plante entière. 1- Caractéristiques générales. 2- utilisation sous forme d'ensilage par les taurillons. 3- utilisation sous forme d'ensilage par les vaches laitières", *Bull. Tech. CRZV Theix*, INRA, 30, 43-58.
- Baumont R., Dulphy J.P., Demarquilly C. (1997) : "Maximiser l'ingestion des fourrages conservés", *Renc. Rech. Ruminants*, 4, 57-64.

Baumont R., Champciaux P., Agabriel J., Andrieu J., Aufrère J., Michalet-Doreau B., Demarquilly C. (1999) : "Une démarche intégrée pour prévoir la valeur des aliments pour les ruminants : PrevAlim pour INRAration", *INRA Prod. Anim.*, 12, 183-194.

Brunschwig P., Carpentier B., Haurez P., Paccard P., Augeard P., Joulie 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 sept. 1996.

Cabon G. (1987) : "Ensilage de maïs : la coupe fine rapporte plus qu'elle ne coute", *Perspectives agricoles*, Supplément au n°113, 53-57.

Coppock C.E., Stone J.B. (1968) : "Corn silage in the ration of dairy cattle. A review", *Cornell Misc. Bull.*, 89.

Davis W.E.P., Bowden D.M. (1969) : "Effect of growth stage at harvest on the nutritive value of a grain corn grown for silage", *Can. J. Plant Sci.*, 49, 361-370.

De Brabender D.L., De Boever J.L., Buysse F.X. (1990) : "The quality and utilization of maize silage for dairy cattle", *Conference British maize growers association*, Maidenhead, U.K., 8 March 1990.

Demarquilly C. (1969) : "Valeur alimentaire du maïs fourrage.1- Composition chimique et digestibilité du maïs sur pied", *Ann. Zootech.*, 45-51.

Demarquilly C., Chenost M. (1969) : "Valeur alimentaire des fourrages dans le rumen par la méthode des sachets de nylon. Liaisons avec la valeur alimentaire", *Ann. Zootech.*, 18, 416-436.

Dubin L.M., Agabriel J., Baumont B., Baumont R., Bolot C., Bourachot J.E., Coulon J.B., Champciaux P., Jeuland H., Riols P. (1998) : "Rationnement des vaches laitières : collaboration innovante entre pratique de terrain et recherche scientifique par l'élaboration d'un logiciel", *Renc. Rech. Ruminants*, 5, 260.

Dulphy J.P., Michalet-Doreau B. (1981) : "Prévision de l'ingestibilité des ensilages d'herbe", *Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants*, Ed. INRA Publications, Route de St-Cyr, 78000 Versailles, 169-187.

Harris J.T. (1965) : "The digestibility of fodder maize and maize silage", *Expl. Agric.*, 1, 121-123.

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.

Jarrige R., Demarquilly C., Dulphy J.P. (1974) : "The voluntary intake of forage", *Quality of Herbage*, 98-106, Värtodling 28, Uppsala.

Malterre C. (1976) : "Utilisation du maïs sous différentes formes pour la production de viande de jeunes bovins", *Bull. Techn. CRZV Theix*, INRA, 24, 63-74.

Noller C.H., Burns J.C., Hill D.L., Rhykerd C.;L., Rumsey T.S. (1963) : "Chemical composition of green and preserved forage and the nutritional implications", *9th Int. Grassl. Congr.*, Sao Paulo, 611-614.

Raymond F. (1985) : "Les variations de consommation et de performances induites par la plante entière de maïs", *Colloque maïs ensilage*, Rennes 29-30 mai 1985, tome 2.

Raymond F., Citron G., Sagot L. (1986) : "Effet de la qualité de l'ensilage de maïs sur les performances des taurillons", *Perspectives Agricoles*, Supplément au n°105, 33-43.

Remond B., Journet M. (1977) : "Utilisation de deux ensilages de maïs de composition morphologique différente par les vaches laitières", *Bull. Tech. CRZV Theix*, INRA, 29, 49-52.

Struik P.C. (1983) : "Physiology of forage maize in relation to its production and quality. Weded", *Landbouwhogeschool Wageningen*, 83-3.

Valentin S.F., Forbes J.M., Lescoat P. (1999) : "Comparison of the voluntary intake by lactating cows of two maize silages with different in situ dry matter degradability", *Ann. Zootech.*, 48, 211-218.

Weiss P., Demarquilly C. (1970) : "Valeur alimentaire des fourrages verts", *Fourrages*, 42, 3-22.

SUMMARY

Digestibility and ingestibility of forage maize : factors affecting their variation and their prediction

This paper shows the main factors of variation and the predicting methods for the digestibility and ingestibility of maize silage. The digestibility of maize silage is nowadays well known, having been

extensively studied, especially in France. However, new investigations should be necessary on the influence of environmental conditions during the period extending from flowering to the glassy stage of the grain (which seems crucial as regards the evolution of digestibility), and also on ways of improving the accuracy of predicting cell-wall digestibility.

The influence of plant characteristics on the ingestibility of the silage is much less known. There are probably significant relationships between, on the one side, maize silage ingestibility and, on the other, its digestibility and speed of degradation, as in the case with the usual forage species, but it seems difficult to set up a hierarchy of these factors without further and more thorough studies. Moreover, the validation of various equations presently available to predict the ingestibility of maize silage under practical conditions (phenotypic value) would imply the creation of new standardized methods.