

Variabilité génétique de la digestibilité *in vivo* d'hybrides de maïs. Bilan de 34 années de mesures

F. Surault, J.C. Emile, M. Briand,
Y. Barrière, R. Traineau

L'ensilage de maïs est largement utilisé pour l'alimentation des ruminants à haut potentiel ; sa valeur alimentaire est le principal facteur influençant les performances des animaux. L'étude des sources de variation et la mise en évidence des critères qui conditionnent la qualité des maïs fourragers est nécessaire pour sélectionner les variétés de demain.

RÉSUMÉ

*Pendant 34 ans, 2 383 mesures de digestibilité d'ensilages de maïs portant sur 478 hybrides ont été réalisées à l'INRA de Lusignan. Ces mesures avec moutons castrés standards ont porté sur tous les types d'hybrides : précoces, tardifs, inscrits, expérimentaux ou encore mutants bm3. La variabilité de la valeur énergétique des ensilages est très importante et elle est fortement conditionnée par la digestibilité des parois (CUDNDF). Si le maïs a une valeur énergétique moyenne de 0,89 UFL, les valeurs mesurées vont de 0,74 à 1,01 UFL. Les hybrides précoces sont plus digestibles que les hybrides tardifs ; les variétés récentes sont en moyenne moins digestibles que les variétés anciennes. Enfin, la mise au point d'outils de prédiction de la digestibilité *in vivo* de la matière organique ou du NDF, utilisables en routine, devraient permettre aux sélectionneurs de proposer des variétés avec des valeurs alimentaires plus élevées.*

MOTS CLÉS

Digestibilité, digestibilité des parois, ensilage, évolution, ingestibilité, maïs, méthode d'estimation, progrès génétique, valeur alimentaire, variabilité génétique.

KEY-WORDS

Cell wall digestibility, digestibility, estimation method, evolution, feeding value, genetic progress, genetic variation, maize, silage, voluntary intake.

AUTEURS

I.N.R.A., Unité de Génétique et d'Amélioration des Plantes Fourragères, Route de Saintes, F-86600 Lusignan ; mél : surault@lusignan.inra.fr

L'utilisation de l'ensilage de maïs offre de nombreux avantages, en particulier pour l'alimentation hivernale des troupeaux dont les besoins de production sont élevés. Celui-ci est facile à produire, se conserve bien et les rendements peuvent atteindre jusqu'à 20 t de matière sèche (MS) par hectare. En plat unique, les éleveurs disposent d'une ration de base à forte valeur énergétique, bien ingérée par les vaches laitières. Sa faible teneur en matières azotées totales (MAT) peut être aisément corrigée par l'incorporation dans la ration de protéagineux produits sur l'exploitation comme le pois, le lupin ou la féverole (BRUNSWIG et LAMY, 2001 ; EMILE *et al.*, 1991 ; FROIDMONT et BARTIAUX-THILL, 2003 ; BRUNSWIG *et al.*, 2004) ou par l'utilisation de tourteaux de colza ou de soja.

La culture du maïs ensilage s'est très fortement développée en Europe du Nord et en France à la fin des années cinquante avec l'apparition des premières variétés résistantes aux basses températures. Actuellement, le maïs ensilage est, en surface, la deuxième source d'alimentation des ruminants en France derrière les prairies (10 millions ha), avec environ 1,4 million d'hectares cultivés (Agreste, 2004).

1. Les motivations de l'étude

À l'apparition des premiers hybrides et des premières lignées de maïs en France, juste après la seconde guerre mondiale, les critères de sélection travaillés étaient exclusivement dédiés à la production de grain. Les sélectionneurs ont considéré pendant de nombreuses années qu'une bonne variété de maïs grain était de toute évidence une bonne variété de maïs fourrage. **C'est seulement depuis quelques années que des efforts de sélection sont réalisés pour créer l'idéotype fourrage** en élargissant progressivement les bases génétiques initiales, de type grain. Le travail a porté sur une amélioration de la biomasse produite, une meilleure tolérance aux basses températures, une résistance accrue à la verse et une amélioration de la valeur alimentaire.

Depuis 1986, lors de l'inscription au catalogue officiel français, **les variétés de maïs sont classées en deux catégories**, "maïs grain" ou "maïs fourrage". Les variétés inscrites sous la dénomination "fourrage" sont évaluées sur des critères de valeur agronomique classiques comme le rendement, la précocité, la tenue de tige mais aussi, depuis 1998, sur un critère qualitatif avec la prise en compte de la valeur énergétique (UFL). Celle-ci est calculée avec l'équation M4 proposée par ANDRIEU et AUFRÈRE (1996) qui tient compte de la digestibilité enzymatique, des teneurs en MAT et en matière organique. Dans le cas du réseau CTPS, toutes ces valeurs sont prédites par NIRS (*Near Infrared Reflectance Spectrometry*).

La valeur énergétique de l'ensilage de maïs, si l'on se réfère aux tables d'alimentation, est comprise entre 0,90 et 0,96 UFL, selon le stade de maturité et le pourcentage de grain (ANDRIEU *et al.*, 1988). Ces valeurs ont été établies à partir des mesures de Coefficient d'Utilisation Digestive de la Matière Organique (CUDMO) réalisées avec des moutons placés en cages à digestibilité mais la base génétique de ces hybrides est étroite et ancienne.

■ Intérêt des mesures sur moutons castrés standards

Pour cette expérimentation, ainsi que dans la plupart des autres études, les mesures de digestibilité *in vivo* sur maïs sont réalisées avec des moutons pour des raisons pratiques et économiques, même si les principaux consommateurs sont les vaches laitières ou les bovins à l'engraissement. Les travaux de CHENOST et MARTIN-ROSSET (1985), AERTS *et al.* (1984) et MORAN *et al.* (1988) montrent qu'un classement identique des digestibilités est obtenu en alimentant des vaches laitières et des moutons avec les mêmes ensilages de maïs. Toutefois, les valeurs de digestibilité observées sont légèrement plus élevées chez les vaches laitières que chez les moutons.

Dans une série d'essais réalisés entre 1991 et 1994 et synthétisés par BRUNSCHWIG *et al.* (1996), des maïs avec des digestibilités sur moutons différentes ont été proposés à des bovins à l'engraissement et à des vaches laitières. Les résultats montrent que les différences de performances zootechniques ainsi que les écarts de valorisation énergétique mesurés sur bovins vont dans le même sens que les résultats des digestibilités réalisées avec les moutons. **Le Coefficient d'Utilisation Digestive de la Matière Organique (CUDMO) mesuré avec des moutons permet, d'une part, d'évaluer un nombre important d'hybrides chaque année et, d'autre part, de réaliser un tri précis des hybrides de maïs sur la valeur énergétique.**

■ Une étude unique en Europe menée à l'INRA de Lusignan sur maïs ensilage

De nombreuses études ont été menées sur la digestibilité du maïs ensilage mesurée par des moutons mais peu portent sur la digestibilité des parois qui est le facteur expliquant le mieux la variation de la valeur énergétique. De plus, les quelques études existantes (présentées dans le tableau 1) ont été réalisées avec du matériel génétique âgé de 30 ans et portaient sur un nombre très restreint d'hybrides précoces qui ne sont pas représentatifs des variétés de maïs utilisées aujourd'hui par les éleveurs.

Cet article présente les résultats obtenus pendant 34 années d'expérimentation (de 1958 à 2002) avec des moutons en cages à digestibilité à l'INRA de Lusignan (BARRIÈRE *et al.*, 2004b), dont une première synthèse avait été réalisée par BARRIÈRE *et al.* (1992a) après 22 années d'essais. Ce travail avait pour objectif, en partant d'une base génétique large d'hybrides de maïs ensilés, d'étudier la variabilité génétique de la valeur énergétique, de la digestibilité *in vivo* de la matière organique et des parois. Parallèlement, des critères biochimiques et

TABLEAU 1 : Résultats de 3 études portant sur la digestibilité de la matière organique et des parois d'hybrides de maïs.

TABLE 1 : Results of 3 studies on the digestibility of organic matter and of cell walls in maize hybrids .

Référence bibliographique	Nombre d'hybrides	CUDMO (%)		CUDNDF (%)		
		moyen		moy.	mini.	maxi.
DEINUM <i>et al.</i> , 1984	25	72,8		52,7	47,5	57,1
ANDRIEU <i>et al.</i> , 1988	-	71 à 74		53,1	49,8	54,8
DE BOEVER <i>et al.</i> , 1988 et 1997	50	74,7		61,4	56,1	68,8

agronomiques étaient mesurés afin de faire le lien avec les variations de la valeur énergétique. Comme il n'était pas possible de tester l'ensemble des hybrides de maïs inscrits en France et en Europe, le choix des hybrides s'est fait sur une gamme la plus large possible à partir des critères suivants : obtenteur, date d'inscription, inscription sous la dénomination "fourrage" ou "grain", qualités agronomiques... Des hybrides non inscrits aux catalogues français et européens, appelés "hybrides expérimentaux" sont venus élargir la base génétique. Les mesures de références (tables INRA) ainsi que les mesures UFL à l'inscription sont ou ont été réalisées avec des hybrides exclusivement précoces ; c'est pourquoi des hybrides tardifs et très tardifs ont été inclus dans cette expérimentation. Enfin, des hybrides mutants *bm3* (*brown-midrib 3*) ont servi pendant toute l'expérimentation de témoins de bonne digestibilité. En effet, le gène *brown-midrib* modifie le métabolisme des phénols, conduisant à une diminution de la teneur en lignine et à une modification de la composition chimique de la lignine. Ces caractéristiques entraînent une augmentation de la digestibilité *in vivo* des parois de 10 à 20% (GALLAIS *et al.*, 1980 ; BARRIÈRE *et al.*, 1985 et 1998b), une valeur énergétique accrue et par conséquent une amélioration des performances zootechniques (ROOK *et al.*, 1977 ; SOMMERFELDT *et al.*, 1979 ; BARRIÈRE *et al.*, 2003b). Ces hybrides apportent une source de variation originale dans la base génétique.

2. Matériel et méthodes

■ La culture des maïs ensilage

Les mesures de valeur alimentaire avec moutons ont été réalisées à l'INRA de Lusignan dans la Vienne (86) entre 1969 et 2002. Avec une pluviométrie moyenne annuelle de 830 mm, la région est caractérisée par des printemps souvent frais suivis d'étés chauds et secs avec un déficit hydrique marqué en juillet - août. À partir de 1975, les cultures ont été irriguées au canon avec 2 à 3 passages de 30 mm suivant les besoins. Les maïs ont été semés à 75 cm d'écartement à des densités variables : 95 000 plantes/ha pour les hybrides très précoces à demi-précoces et 75 à 85 000 plantes/ha pour les hybrides tardifs à très tardifs. Pour une année donnée, chaque hybride étudié a fait en général l'objet de deux répétitions ; une répétition correspond à une parcelle de 150 m². Les maïs ont été récoltés en ensilage avec comme objectif une teneur en matière sèche comprise entre 30 et 35%. Toutefois, ces valeurs ont été soit dépassées dans le cas d'hybrides très précoces, soit non atteintes dans le cas d'hybrides très tardifs. Chaque parcelle récoltée a été stockée dans un mini-silo cylindrique, formé d'une bâche en polyuréthane (150 µ) entourée d'un treillis métallique, le tout posé sur une palette (TRAINEAU, 1991). Pendant le remplissage du silo, trois échantillons de 300 g ont été réalisés afin de déterminer la composition biochimique du fourrage ensilé ; le rendement de chaque parcelle a été mesuré par pesée du mini-silo. Une période minimum de 40 jours a été observée chaque année entre la récolte et l'ouverture des premiers silos et aucune mesure de conservation n'a été effectuée au cours de leur utilisation.

■ Les mesures avec moutons castrés standards

Chaque mesure de valeur alimentaire a été réalisée avec 6 moutons castrés standards, âgés de 2 à 5 ans et alimentés individuellement en cage à digestibilité. Pour équilibrer la ration, de l'urée, du bicarbonate de sodium et un complément minéral vitaminé ont été apportés. Les pertes de produits volatils durant l'étuvage ont été estimées à partir des méthodes proposées par DULPHY *et al.* (1975 et 1981). Jusqu'en 1995, les moutons étaient alimentés *ad libitum* avec une quantité de matière sèche offerte correspondant à 110% du consommé de la veille et l'ingestion moyenne était de 48 g MS/kg de poids métabolique ($P^{0.75}$). A partir de 1996, pour simplifier les mesures et s'affranchir des éventuelles interactions entre le niveau d'ingestion et la digestibilité, les animaux ont été alimentés en quantités limitées, le niveau de l'entretien étant fixé à 40 g MS/kg $P^{0.75}$. Les animaux ont été nourris en deux repas quotidiens.

Pour mesurer la digestibilité de chaque ensilage, les fèces ont été récoltées pendant 5 jours consécutifs après une période pré-expérimentale de 7 jours. Les mesures de valeur alimentaire ont porté principalement sur le Coefficient d'Utilisation Digestive de la Matière Organique (CUDMO) et des parois (CUDNDF). Ces valeurs ont été déterminées à partir des teneurs en matière organique et en NDF (*Neutral Detergent Fiber*) réalisées sur l'ensilage distribué et sur les fèces, en accord avec DEMARQUILLY *et al.* (1995). Avant 1995, la cellulose brute (CB) était le critère utilisé pour estimer la teneur en parois. A partir de 1996, la proportion de parois a été mesurée par la teneur en NDF (GOERING et VAN SOEST, 1971). Dans la suite de l'article, seules les teneurs en NDF et les CUDNDF sont présentés. Pour les résultats antérieurs à 1995, ces valeurs ont été calculées à partir d'une régression linéaire entre le NDF et la cellulose brute, et entre le CUDNDF et le CUDCB ($r^2 = 0,86$). Les teneurs en Matières Azotées Totales (MAT = azote Kjeldahl x 6,25) ont été calculées pour tous les hybrides. Les teneurs en grain ont été soit mesurées sur les parcelles à partir d'un échantillon de 15 plantes (avant 1995), soit estimées à partir de la teneur en amidon des ensilages en vert (après 1995) à partir de la régression proposée par ANDRIEU *et al.* (1993).

■ Types d'hybrides évalués et nombre de mesures

Ce sont au total 2 383 mini-silos qui ont été évalués, correspondant à 478 hybrides de maïs, dont 305 hybrides inscrits au catalogue français ou à un catalogue européen et 173 hybrides expérimentaux dont 45 hybrides bm3. Ces hybrides étaient inégalement répartis dans les 6 groupes de précocité du catalogue français avec 403 variétés regroupées sous l'appellation "précoce" (de très précoces à demitardives) dont 252 variétés inscrites, et 75 hybrides appelés "tardifs" dont 53 hybrides inscrits (tableau 2). Dans les tableaux de résultats, les hybrides récemment inscrits ont été codés Rh pour des raisons de confidentialité. Certains hybrides (Inra 258, Inra 260, LG11, Adonis, DK265...) ont été mesurés régulièrement ; ils ont ainsi servi à ajuster les années entre elles. Chaque donnée élémentaire (mini-silo) a été calculée à partir de la moyenne des 6 moutons sur 5 jours de mesures.

Groupe de précocité	Indice FAO	Nombre d'hybrides	Hybrides inscrits	Hybrides expérimentaux	
				normaux	bm3
Très précoce	170 - 240	70	57	11	2
Précoce	240 - 280	155	104	34	17
Demi-précoce et demi-tardif	280 - 480	178	91	69	18
Tardif	480 - 530	43	23	12	8
Très tardif	530 - 600	32	30	2	
Total		478	305	128	45

Les analyses de variance ont été réalisées selon les modèles classiques à effets fixes en prenant en compte un effet année, un effet silo hiérarchisé dans l'année, un effet génotype et un effet de l'interaction génotype x année. Ce type d'analyse de variance a été effectué sur l'ensemble des 2 383 mini-silos évalués au cours de l'expérimentation et sur certains sous-groupes d'hybrides tels que les hybrides normaux (sans bm3), les hybrides précoces, les hybrides précoces inscrits, les hybrides précoces normaux et les hybrides tardifs inscrits. Une analyse de variance et une estimation des moyennes ont été spécialement réalisées sur 31 génotypes et leurs équivalents bm3 regroupant 554 mini-silos.

3. Résultats et discussion

Pour l'ensemble des 478 hybrides évalués, la teneur en matière sèche des ensilages est en moyenne de 34,5% (de 20,3 à 43,2%), avec une teneur en MAT moyenne de 8% (de 5,9 à 11,1%), une teneur en grain de 43,2% (de 24,3 à 60,6%) correspondant à une teneur en amidon de 28,6% (de 14,6 à 41%).

■ Une importante variabilité génétique pour la digestibilité *in vivo*

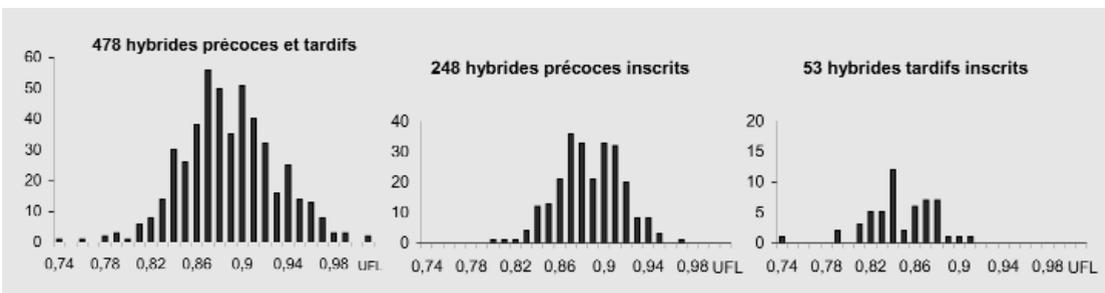
Les histogrammes de fréquence des hybrides dans chacune des classes de valeurs UFL mettent en évidence une grande variabilité entre hybrides pour la valeur énergétique, de 0,74 à 1,01 UFL (figure 1). Pour les hybrides inscrits, l'écart est de l'ordre de 0,17 UFL quelle que soit la précocité mais les limites de fréquence sont différentes, comprises entre 0,80 et 0,97 UFL pour les hybrides précoces et entre 0,74 et 0,91 UFL pour les hybrides tardifs.

TABLEAU 2 : Répartition des hybrides de maïs évalués, en fonction de leur précocité et de leur caractère commercial ou expérimental.

TABLE 2 : Distribution of the studied maize hybrids, according to heading date and to whether commercial or experimental.

FIGURE 1 : Histogrammes de fréquence des hybrides de maïs dans les classes de valeurs UFL comprises entre 0,74 et 1,01.

FIGURE 1 : Histogram of the frequencies of maize hybrids in the UFL value classes ranging from 0.74 and 1.01.



Les effets liés au génotype sont significatifs pour tous les groupes d'hybrides. Les hybrides bm3 apportent une source de variation importante pour le CUD_{MO} et le CUD_{NDF} : lorsqu'ils sont inclus dans l'analyse de variance, les variances pour ces deux critères sont en effet doublées. Ce n'est pas le cas pour d'autres caractères comme la teneur en NDF, la teneur en grain ou le rendement. Les variances comparables des CUD_{MO} et CUD_{NDF} des deux groupes d'hybrides, hybrides normaux et hybrides précoces inscrits, montrent l'importante variabilité qui existe au sein des hybrides précoces inscrits. Avec un nombre limité de génotypes évalués, les variances observées pour le groupe des hybrides tardifs inscrits sont significatives mais restent faibles comparées aux hybrides précoces.

Chez les hybrides normaux (précoces et tardifs sans bm3), le CUD_{NDF} varie du simple au double, de 32,9 à 60,4%. Cette variabilité est aussi observée chez les hybrides tardifs inscrits (32,9 à 58,1%) et dans une moindre mesure chez les précoces inscrits (tableau 3). Les hybrides bm3 précoces et tardifs se distinguent de leurs homologues normaux inscrits de même précocité par des valeurs énergétiques moyennes respectivement supérieures de 0,06 et 0,09 UFL. Les valeurs moyennes des CUD_{MO} des bm3 précoces et tardifs correspondent aux valeurs les plus élevées observées chez les variétés inscrites de même précocité. De même, pour la digestibilité des parois, alors que les valeurs les plus élevées chez les génotypes inscrits sont approximativement de 58%, 62% des hybrides bm3 ont un CUD_{NDF} supérieur à cette valeur.

TABLEAU 3 : Valeurs des critères de digestibilité et de rendement observés pour les différents groupes d'hybrides de maïs.

TABLE 3 : Values of the digestibility and the yield criteria observed in the various groups of hybrid maize.

Groupe d'hybrides	Nombre d'hybrides	CUD _{MO} (%)	CUD _{NDF} (%)	UFL (/kg MS)	Rendement (t MS/ha)
		moy. (mini-maxi)	moy. (mini-maxi)	moy. (mini-maxi)	moy. (mini-maxi)
Tous les hybrides	478	70,0 (61,3-76,9)	49,6 (32,9-65,6)	0,89 (0,74-1,01)	15,3 (8,0-21,6)
Hybrides normaux	425	69,6 (61,3-76,0)	48,6 (32,9-60,4)	0,88 (0,74-0,99)	15,6 (8,8-21,6)
Hybrides bm3	45	73,6 (68,1-76,9)	58,6 (52,3-65,6)	0,95 (0,84-1,01)	12,9 (8,2-17,1)
Hybrides précoces					
- normaux	358	69,9 (62,9-76,0)	48,8 (35,9-60,4)	0,89 (0,76-0,99)	15,3 (8,8-21,3)
- inscrits	248	69,8 (65,4-74,4)	48,2 (39,3-58,7)	0,88 (0,80-0,97)	15,9 (8,8-21,3)
- bm3	37	73,8 (68,6-76,9)	58,4 (52,3-63,8)	0,95 (0,85-1,01)	12,3 (8,2-16,2)
Hybrides tardifs					
- normaux	67	67,8 (61,3-71,7)	47,5 (32,9-58,1)	0,85 (0,74-0,91)	17,2 (10,7-21,6)
- inscrits	53	67,6 (61,3-71,7)	46,6 (32,9-58,1)	0,84 (0,74-0,91)	18,8 (13,0-21,6)
- bm3	8	72,8 (68,1-75,1)	59,5 (55,3-65,6)	0,94 (0,85-0,97)	15,7 (12,6-17,6)

■ Une valeur énergétique plus faible chez les hybrides tardifs

Après 34 années de mesures, les hybrides tardifs inscrits ont en moyenne une valeur UFL et un CUD_{MO} inférieurs de 0,04 et 2,2 points respectivement (tableau 3). Le rendement moyen des hybrides tardifs est supérieur de 3 t MS/ha et le CUD_{NDF} inférieur de 2,2 points comparé aux hybrides précoces. Avec un rendement moyen supérieur, les hybrides tardifs permettent de produire 1 800 UFL/ha de plus que les précoces.

Une étude particulière a été menée en 2000 et 2001 avec 28 géotypes tardifs inscrits entre 1992 et 2001. Les résultats obtenus sont comparés à ceux des hybrides précoces, inscrits pendant la même période (tableau 4). Les résultats sont légèrement différents de ceux obtenus avec l'ensemble des données. La valeur énergétique moyenne des tardifs est inférieure de 0,03 UFL et varie de 0,82 à 0,90 UFL ; elle varie de 0,83 à 0,97 chez les précoces. Le CUD_{Mo} est en moyenne inférieur de 1,6 points et le rendement moyen est supérieur de 2,3 t MS pour les tardifs. La teneur en parois chez les tardifs est en moyenne supérieure et la digestibilité de ces parois reste inférieure à celle des hybrides précoces, ce qui peut pénaliser l'ingestibilité des ensilages de maïs tardifs. Les 28 hybrides tardifs évalués, avec une valeur énergétique plus faible mais compensée par un rendement (MS) supérieur, produisent en moyenne 1 400 UFL/ha de plus que les hybrides précoces.

Hybride	UFL (/kg MS)	CUD _{Mo} (%)	CUD _{NDF} (%)	Teneur en NDF (%)	Rendement (t MS/ha)
151 hybrides précoces					
Moyenne	0,88	69,7	47,5	40,2	16,7
Mini	0,83	66,1	39,3	33,9	13,1
Maxi	0,97	74,4	55,3	50,0	21,4
28 hybrides tardifs					
Moyenne	0,85	68,1	46,5	42,4	19,0
Mini	0,82	66,0	42,7	39,0	16,6
Maxi	0,90	70,5	53,0	45,8	21,6

TABLEAU 4 : Valeurs des critères énergétiques, de digestibilité et de rendement observés pour 151 hybrides précoces et 28 hybrides tardifs inscrits entre 1992 et 2001.

TABLE 4 : Values of the energy, the digestibility and the yield criteria observed in 151 early-heading and 28 late-heading hybrids registered between 1992 and 2001.

■ Une valeur énergétique très liée à la digestibilité des parois

Les corrélations génotypiques entre les digestibilités, les critères agronomiques et la valeur énergétique sont présentées dans le tableau 5. Comme l'ont déjà démontré ANDRIEU et DEMARQUILLY (1974), BARRIÈRE *et al.* (1991 et 1992b), la teneur en matière sèche n'a pas d'effet sur la valeur énergétique de l'ensilage à partir du moment où elle est supérieure à 25%. En revanche, la teneur en matière sèche a un effet bien connu sur les quantités ingérées (ANDRIEU et BAUMONT, 2000). BARRIÈRE *et al.* (2003b) relèvent sur vaches laitières une augmentation des quantités ingérées de 0,11 kg par point de matière sèche supplémentaire. La relation entre la teneur en grain et la valeur énergétique reste faible et confirme les résultats obtenus sur vaches laitières et sur taurillons par BARRIÈRE et ÉMILE (1990) et BARRIÈRE *et al.* (1995) qui obtiennent des performances zootechniques comparables entre des ensilages de maïs normaux et les mêmes ensilages de maïs appauvris en grain. Le CUD_{NDF} est le critère le mieux corrélé à la valeur énergétique pour les hybrides précoces inscrits et à la digestibilité de la matière organique pour l'ensemble des hybrides normaux ainsi que pour les hybrides précoces inscrits. La corrélation entre la teneur en NDF et la digestibilité de celui-ci est proche de zéro et montre qu'il n'y a aucun lien entre la teneur en parois et leur digestibilité lorsque les maïs sont récoltés au même stade de maturité. Les liaisons négatives entre le rendement

TABLEAU 5 : **Corrélations génotypiques entre des critères agronomiques (teneur en grain, rendement, teneur en matière sèche) et les critères de valeur alimentaire étudiés (UFL, CUDMO, CUDNDF, teneur en NDF) pour l'ensemble des hybrides normaux (sans bm3) et chez les hybrides précoces inscrits.**

TABLE 5 : **Genotypic correlations between agricultural criteria (grain content, yield, dry matter content) and feed criteria (UFL, CUDMO, CUDNDF, NDF content) for all normal hybrids (without bm3) and early-heading registered hybrids.**

Groupe d'hybrides	UFL	CUDMO	CUDNDF	Teneur en NDF	Teneur grain	Rendement	Teneur en MS
Hybrides normaux							
UFL	-						
CUDMO	1	-					
CUDNDF	0,74	0,77	-				
Teneur en NDF	-0,74	-0,72	-0,06	-			
Teneur en grain	0,57	0,54	0,10	-0,73	-		
Rendement	-0,52	-0,53	-0,52	0,27	-0,12	-	
Teneur en MS	0,20	0,17	-0,09	-0,38	0,57	-0,03	-
Hybrides précoces inscrits							
UFL	-						
CUDMO	1	-					
CUDNDF	0,73	0,76	-				
Teneur en NDF	-0,59	-0,55	0,10	-			
Teneur en grain	0,36	0,32	-0,16	-0,63	-		
Rendement	-0,53	-0,55	-0,56	0,18	0,13	-	
Teneur en MS	0,03	-0,03	-0,18	-0,15	0,42	0,11	-

et la valeur énergétique, ainsi que le CUDMO et le CUDNDF sont assez faibles et permettent de choisir des hybrides productifs avec une bonne valeur énergétique.

■ Un lien étroit entre digestibilité des parois et ingestibilité

L'ingestibilité et la digestibilité d'un fourrage sont les premiers facteurs qui conditionnent les performances zootechniques des animaux. La teneur en matière sèche des ensilages de maïs a un rôle important sur les quantités ingérées. Lorsqu'elle est comprise entre 32 et 37%, cette teneur assure à l'ensilage une bonne conservation, une appétibilité correcte et une ingestion élevée. Cependant, à même teneur en matière sèche, l'ingestibilité des ensilages mesurée par les quantités ingérées par les animaux est directement influencée par l'hybride de maïs. Peu d'études traitent des relations entre, d'une part, la variabilité génétique et la digestibilité *in vivo* et, d'autre part, la variabilité génétique et l'ingestibilité. BARRIÈRE *et al.* (2003b) montrent l'influence de l'hybride de maïs sur les quantités ingérées et mettent en évidence que 50 à 77% des variations de quantités ingérées observées sont expliquées par le CUDNDF qui joue un rôle dans la vitesse de dégradation des particules dans le rumen. Néanmoins, l'ingestibilité ou la capacité d'encombrement de l'ensilage de maïs dépend aussi d'un autre facteur génétique non lié à la digestibilité du NDF, qui est la résistance mécanique du fourrage à être mastiqué par les animaux (BARRIÈRE *et al.*, 2004a).

■ Une baisse de la valeur énergétique chez les hybrides récemment inscrits

BARRIÈRE et ARGILLIER (1998a) avaient montré une diminution significative de la digestibilité *in vivo* des hybrides inscrits, avec des génotypes inscrits avant 1989 qui apparaissent en moyenne plus digestibles que des hybrides inscrits entre 1989 et 1994. Avant 1998, il n'existait pas en France de critère de digestibilité pour l'inscription

des variétés de maïs fourrage. L'étude des données des CUD_{MO} et des valeurs énergétiques des hybrides précoces inscrits au cours de 5 périodes, 1958-1980, 1981-1988, 1989-1993, 1994-1999 et 1999-2002 révèle une baisse constante de la valeur alimentaire des hybrides (tableau 6). En prenant comme témoin un génotype comme DK 265 (0,92 UFL ; CUD_{MO}=71,8% ; CUD_{NDF}=51,4%), 25% des hybrides précoces inscrits avant 1989 ont un CUD_{MO} supérieur à DK 265. Pour les génotypes inscrits entre 1989 et 1998, seulement 7% ont un CUD_{MO} supérieur à DK 265 et aucun hybride inscrit après 1998 n'obtient un CUD_{MO} supérieur au génotype témoin. Parallèlement, seulement 18% des hybrides inscrits avant 1989 ont un CUD_{NDF} inférieur à Hélix (0,87 UFL ; CUD_{MO}=69,1% ; CUD_{NDF}=47,6%) ; ils sont 45% pour la période d'inscription 1989-1998 et 70% des hybrides inscrits après 1998 ont un CUD_{NDF} inférieur à Hélix.

Période d'inscription	UFL (/kg MS)	CUD _{MO} (%)	CUD _{NDF} (%)	NDF (%)	Grain (%)	MAT (%)	Rendement (t MS/ha)
1958 – 1980	0,902	70,9	51,1	39,9	43,8	8,2	12,5
1981 – 1988	0,899	70,7	49,9	40,3	42,9	8,1	14,4
1989 – 1993	0,885	69,8	48,4	40,9	44,9	8,0	16,1
1994 – 1999	0,884	69,7	47,6	40,3	44,5	7,9	16,4
1999 – 2002	0,872	69,0	45,7	39,9	45,1	7,7	18,1
1958 – 2002	0,88	69,9	48,2	40,3	44,4	8,0	15,9

Cette diminution de la valeur énergétique a des conséquences sur les performances zootechniques des animaux. Pour des vaches laitières ingérant 15 kg de matière sèche d'ensilage de maïs par jour et en se basant sur les valeurs énergétiques, Dea (inscrit en 1980) permettrait de produire 0,8 kg de lait en moins (par vache et par jour) comparé à INRA 258 inscrit en 1958. Avec Anjou 285, inscrit en 1994, la baisse de production devrait atteindre 2,6 kg de lait et elle serait de 3,6 kg pour l'hybride avec la valeur énergétique la plus faible inscrit en 2002 comparé à INRA 258. Cependant, un hybride comme Rh 383, inscrit en 2001, doit permettre de produire autant de lait que Dea avec un rendement en matière sèche supérieur de 4 t/ha. La période d'inscription n'ayant pas d'effet significatif sur la teneur en grain, même si celle-ci a tendance à augmenter, la baisse de digestibilité observée est directement liée à la diminution de la digestibilité des parois qui perd en moyenne 5 points sur la période 1958-2002. L'apparition en 1998 d'un critère de digestibilité à l'inscription des variétés de maïs fourrage n'a pas enrayé cette baisse de qualité. Toutefois, quatre années ne sont probablement pas suffisantes pour inverser cette tendance et des progrès sont attendus dans les années à venir.

■ Une augmentation constante du rendement en matière sèche

Des progrès génétiques évidents sur des critères agronomiques ont été réalisés chez le maïs au cours des 50 dernières années en Europe (DERIEUX *et al.*, 1987 ; BARRIÈRE *et al.*, 1987) avec en particulier un accroissement du rendement et de sa stabilité, une résistance accrue à la verse ou encore un renforcement de l'effet *stay-green*

TABEAU 6 : Evolution des critères de valeur alimentaire et rendement étudiés en fonction de la période d'inscription pour les hybrides précoces de maïs.

TABLE 6 : Evolution with the period of registration of the feeding value and the yield criteria studied in the early-heading maize hybrids.

(aptitude des plantes à rester vertes pendant la période de dessiccation du grain). Pour le maïs fourrage, l'augmentation du rendement, résultant des progrès génétiques et agronomiques, est proche de 0,17 t MS/ha/an pour les hybrides inscrits entre 1986 et 2000. En se basant sur les valeurs moyennes entre 1958 et 2002, le progrès génétique moyen pour le rendement est estimé à 0,10 t MS/ha/an pour la période 1958-1988 et à 0,14 t MS/ha/an pour la période 1989-2002. Comme pour le rendement fourrager, les progrès génétiques réalisés avant 1986 sur le rendement en grain apparaissent plus faibles qu'entre 1990 et 2000. Pendant la période 1980-1990, la contribution de la génétique à l'augmentation du rendement en grain est voisine de 0,117 t/ha/an, alors qu'elle passe à 0,130 t/ha/an entre 1990 et 2000 (GALLAIS, 2002). Aux Etats-Unis, LAUER *et al.* (2001) constatent depuis 1930 une augmentation moyenne du rendement du maïs, utilisé en fourrage mais sélectionné principalement sur des critères "grain", comprise entre 0,13 et 0,16 t MS/ha/an. Mais dans le même temps, ils n'observent pas de diminution de la digestibilité *in vitro* ni de la digestibilité des parois des maïs utilisés en ensilage alors que des progrès notables sont réalisés sur la résistance des tiges à la verse. Les résultats contradictoires relevés en Europe et aux Etats-Unis sur l'évolution des valeurs de digestibilité peuvent être attribués à l'utilisation de bases génétiques d'origines différentes dans les schémas de sélection européens et américains.

TABLEAU 7 : Comparaison d'hybrides de maïs normaux et de leur homologue bm3 pour la valeur énergétique, la digestibilité de la matière organique et des parois, le rendement et la teneur en grain.

TABLE 7 : Comparison of normal with the corresponding bm3 types of maize hybrids as regards the energy value, the organic matter and cell-wall digestibility, the yield and the grain content.

■ Comparaison d'hybrides normaux et de leur homologue bm3

Pour les 31 couples d'hybrides normaux et bm3 évalués (tableau 7), l'effet génétique est toujours significatif pour la valeur UFL, le CUDMO, le CUDNDF, la teneur en NDF, le rendement et la teneur en grain. La teneur en grain moyenne est légèrement inférieure chez les hybrides bm3, même si certains bm3 ont des teneurs en grain équivalentes à leurs homologues normaux. Le rendement en matière sèche est toujours inférieur chez les bm3 et plus le rendement du génotype normal est important, plus cet écart augmente. Les hybrides bm3 obtiennent en moyenne un CUDMO de 3,5 points supérieur aux hybrides normaux, ce qui représente un écart de 0,06 UFL/kg MS correspondant au besoin énergétique pour la production de 2,1 kg de lait pour une vache ingérant 15 kg MS d'ensilage de maïs. Le CUDNDF est en moyenne supérieur de 8,7 points chez les hybrides bm3, mais l'écart varie de 0,9 à 17,9 points en fonction des couples d'hybrides testés. La corrélation entre les hybrides normaux et bm3, pour la digestibilité des parois, n'est que de 0,65.

Hybride	UFL		CUDMO (%)		CUDNDF (%)		Rendement (t MS/ha)		Teneur en grain (%)	
	norm.	bm3	norm.	bm3	norm.	bm3	normal	bm3	normal	bm3
Moyenne 31 hybrides	0,89	0,95	70,0	73,5	49,4	58,1	14,3	12,4	43,8	41,8
Mini	0,81	0,85	66,0	67,2	43,1	50,9	7,8	4,7	28,2	25,5
Maxi	0,95	1,01	73,5	76,3	58,6	64,2	19,8	16,6	55,1	53,5
INRA 258 (1958)	0,92	0,97	72,2	74,5	53,8	60,1	11,7	11,2	44,0	46,4
LG 11 (1970)	0,92	0,96	71,5	74,3	50,8	60,4	12,7	11,6	45,5	45,3
Adonis (1984)	0,89	0,96	70,4	73,9	48,7	56,2	16,2	13,5	45,5	42,2
DK 265 (1987)	0,91	0,98	71,4	75,4	50,0	61,5	13,7	12,1	45,9	42,5
Helix (1993)	0,86	0,97	68,6	74,9	46,0	58,2	15,9	13,2	44,8	46,5

Avec une valeur énergétique supérieure et un rendement fourrager inférieur, les hybrides bm3 produisent en moyenne 950 UFL/ha de moins que les hybrides normaux. Cette situation ne remet pas en cause l'intérêt de la mutation bm3 car les ensilages d'hybrides bm3 sont mieux ingérés par les animaux (BARRIÈRE *et al.*, 2003a). En supposant que ce type d'hybride soit utilisé un jour dans les exploitations laitières, il devrait permettre des économies importantes de concentré.

■ Des outils pour prédire la valeur alimentaire des maïs

L'utilisation dans les programmes de sélection d'un critère mesuré comme le CUD_{NDF} n'est pas envisageable. Les sélectionneurs ont besoin d'une méthode rapide, facile à utiliser, avec laquelle on peut passer un grand nombre d'échantillons à moindre coût. En revanche, l'utilisation de ce critère en prédiction NIRS est possible. A partir de 1 672 spectres (échantillons), correspondant à 866 minisilos mesurés par les moutons pendant 6 ans, de 1997 à 2002, une équation NIRS a été calibrée. Pour le CUD_{NDF} prédit, le coefficient de détermination et l'erreur de la validation croisée de la calibration sont respectivement de 0,64 et 4,14. Pour le CUD_{MO}, les deux mêmes résultats de calibration sont de 0,63 et 1,89 respectivement. Ces valeurs peuvent être comparées aux valeurs de référence pour la calibration de la solubilité enzymatique, développées par CRA Libramont avec un coefficient de détermination et une erreur de la validation croisée de 0,84 et 2,23. Les valeurs de digestibilité obtenues avec les animaux sont moins répétables que les valeurs de solubilité enzymatique réalisées en laboratoire ; par conséquent, la qualité de la prédiction de la digestibilité *in vivo* est légèrement inférieure. Cependant, la précision des valeurs de CUD_{MO} prédites par le NIRS est comparable, voire supérieure, à celles couramment utilisées et basées sur la solubilité enzymatique.

Conclusion

Le choix de l'hybride de maïs est un élément important à prendre en compte dans le calcul des rations. Un mauvais choix peut avoir des conséquences importantes sur les performances des animaux et sur la rentabilité de l'élevage. Depuis 1998, la prise en compte d'un critère de digestibilité à l'inscription des variétés, avec la création d'une catégorie "fourrage" et la publication des résultats, est un plus pour l'éleveur. Toutefois, ces résultats ne concernent que les éleveurs de la moitié nord de la France qui utilisent des variétés précoces. Le fait qu'il n'y ait pas de catégorie "fourrage" à l'inscription pour les maïs tardifs ne permet pas aux éleveurs qui utilisent ces génotypes de choisir les variétés les mieux adaptées à une utilisation en ensilage. La forte variabilité génétique pour la valeur énergétique (de 0,74 à 0,91 UFL) observée chez les hybrides tardifs confirme la nécessité d'évaluer à l'inscription ces hybrides pour une utilisation en ensilage.

Le choix de génotypes de bonne valeur énergétique doit permettre de calculer des rations, sur la base de 0,93-0,94 UFL pour les précoces et de 0,89-0,90 UFL pour les tardifs, pour des maïs en

conditions de végétation normale. Par conséquent, la valeur habituellement utilisée de 0,90 pourra être revue à la hausse dans le cas d'hybrides précoces améliorés.

Cette étude met en évidence une relation étroite entre la digestibilité des parois et la valeur énergétique. Pour l'ensemble des hybrides testés, la digestibilité des parois varie de 25% (20% pour les hybrides inscrits), avec un CUD_{NDF} moyen de 49%. La baisse observée de la digestibilité des parois chez les hybrides de maïs récemment inscrits a pour conséquence une baisse de l'ingestibilité des ensilages. Il est regrettable que l'augmentation du rendement fourrager, fruit du progrès génétique, ne se soit pas accompagnée dans le même temps d'une augmentation de la digestibilité des parois. Jusqu'à présent la sélection du maïs était essentiellement orientée sur des critères "grain", entraînant une dérive négative de la valeur alimentaire des hybrides. L'exploration de ressources génétiques anciennes permettant d'isoler des génotypes de bonnes digestibilité et ingestibilité n'a jamais été réalisée en maïs grain. En raison d'un niveau de rendement faible ou d'une moindre résistance des tiges à la verse, ces ressources génétiques ont été négligées. ARGILLIER (1995) a montré que, chez le maïs, une valeur alimentaire élevée n'était pas nécessairement synonyme de valeur agronomique faible. En raison des différences importantes de valeur agronomique qui séparent les anciennes lignées des génotypes récents, la voie à suivre en matière d'amélioration génétique serait le développement de stratégies d'introggression des caractères de valeur alimentaire chez les hybrides actuels.

Avec l'utilisation de la génomique, la mise en évidence des gènes liés à la digestibilité et en particulier des gènes liés aux mécanismes de la lignification, des progrès génétiques pour l'amélioration de la valeur alimentaire sont attendus chez les hybrides de demain.

Accepté pour publication, le 22 février 2005.

Remerciements

Nous remercions particulièrement, André GALLAIS qui a été l'initiateur de la démarche à Lusignan ainsi que Jean-Luc DOUX, Jean MOINET et Claude PRADEAU qui ont conduit les mesures de digestibilité avec les moutons pendant de longues années. Sans oublier, Simone ALLERIT, Henri BERTHET, Georges BERTIN, Monique BUCHER, Dominique DÉNOUE, Lionel HUGUET, Michel LARGEAUD, Catherine LÉVÊQUE, Marc LILA, Corinne MELIN-DECAMP, Véronique MENANTEAU, Christiane MINAULT, Pascal VERNOUX qui ont tous d'une manière ou d'une autre contribué au bon déroulement de cette étude. Nous remercions également les sélectionneurs privés réunis au sein du groupe de travail ProMaïs DINAG pour leur contribution financière (Advanta, Caussade semences, Corn States, Limagrain Genetics, MaïsAdour, Monsanto SAS, Nordsaat Strube France, Pioneer Génétique, Pau Euralis, R2n RAGT Semences, SDME KWS France, Syngenta seeds, Verneuil Recherches, Zelder Golden Harvest).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AERTS J.V., DE BOEVER J.L., COTTYN B.G., DE BRABANDER D.L., BUYSSE F.X. (1984) : "Comparative digestibility of feedstuffs by sheep and cows", *An. Feed Sci. and Technol.*, 12, 47-56.
- Agreste (2004) : *Statistique agricole annuelle, fourrages et prairies résultats 2004*, SCEES.
- ANDRIEU J., DEMARQUILLY C. (1974) : "Valeur alimentaire du maïs fourrage. II. Influence du stade de végétation, de la variété, du peuplement, de l'enrichissement en épis et de l'addition d'urée sur la digestibilité et l'ingestibilité de l'ensilage de maïs", *Ann. de Zootech.*, 23, 1-25.
- ANDRIEU J., DEMARQUILLY C., SAUVANT D. (1988) : "Tables de la valeur nutritive des aliments", *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, R. Jarrige, INRA éditeur, 351-464.
- ANDRIEU J., DEMARQUILLY C., DARDENNE P., BARRIERE Y., LILA M., MAUPETIT P., RIVIERE F., FEMENIAS N. (1993) : "Composition and nutritive value of whole maize plant fed fresh to sheep. I. Factors of variation", *Ann. de Zootech.*, 42, 221-249.
- ANDRIEU J., AUFRERE 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, 61-69.
- ANDRIEU J., BAUMONT R. (2000) : "Digestibilité et ingestibilité du maïs fourrage : facteurs de variation et prévision", *Fourrages*, 163, 239-252.
- ARGILIER O. (1995) : *Relations entre verses, valeur alimentaire et productivité chez le maïs fourrage*, thèse de Doctorat, Institut National Agronomique, Paris - Grignon.
- BARRIERE Y., GALLAIS A., HUGUET L., TRAINÉAU R. (1985) : "Le maïs brown-midrib plante entière", *Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix INRA*, 60, 43-58.
- BARRIERE Y., GALLAIS A., DERIEUX Y., PANOUILLE A. (1987) : "Etude de la valeur agronomique en plante entière au stade de récolte ensilage de différentes variétés de maïs grain sélectionnées entre 1950 et 1980", *Agronomie*, 7, 73-79.
- BARRIERE Y., EMILE J.C. (1990) : "Effet des teneurs en grain et de la variabilité génétique sur la valeur énergétique du maïs ensilage mesurée par des vaches laitières", *Agronomie*, 10, 201-212.
- BARRIERE Y., DEMARQUILLY C., HEBERT Y., DARDENNE P., ANDRIEU J., MAUPETIT P., LILA M., EMILE J.C. (1991) : "Influence de la variabilité génétique et environnementale sur la digestibilité in vitro ou in vivo du maïs fourrage", *Agronomie*, 3, 151-157.
- BARRIERE Y., TRAINÉAU R., EMILE J.C., HEBERT Y. (1992a) : "Variation and covariation of silage maize digestibility estimated from digestion trials with sheep", *Euphytica*, 59, 61-72.
- BARRIERE Y., TRAINÉAU R., EMILE J.C., HEBERT Y. (1992b) : "Variabilité génétique de la digestibilité du maïs ensilage mesurée sur des moutons standards", *Productions animales*, 5, 247-255.
- BARRIERE Y., EMILE J.C., HEBERT Y. (1995) : "Genetic variation in the feeding efficiency of maize genotypes evaluated from experiments with fattening bulls", *Agronomie*, 15, 539-546.
- BARRIERE Y., ARGILLIER O. (1998a) : "In vivo silage feeding value of early hybrids released in France between 1958 and 1994", *Euphytica*, 99, 175-182.
- BARRIERE Y., ARGILLIER O., MECHIN V. (1998b) : "In vivo digestibility and biomass yield in normal and bm3 hybrids made from crossing between early and medium late lines of maize", *Maydica*, 43, 131-136.
- BARRIERE Y., GUILLET C., GOFFNER D., PICHON M. (2003a) : "Genetic variation and breeding strategies for improved cell wall digestibility in annual forage crops. A review", *Animal Research*, 52, 193-228.
- BARRIERE Y., EMILE J.C., SURAULT F. (2003b) : "Genetic variation of silage maize ingestibility in dairy cattle", *Animal Research*, 52, 489-500.
- BARRIERE Y., DIAS GONCALVES G., EMILE J.C., LEFEVRE B. (2004a) : "Higher ingestibility of the DK 265 corn silage in dairy cattle", *J. of Dairy Sci.*, 87, 1439-1445.

- BARRIERE Y., EMILE J.C., TRAINÉAU R., SURAULT F., BRIAND M., GALLAIS A. (2004b) : "Genetic variation for organic matter and cell wall digestibility in silage maize. Lessons from 34-year long experiment with sheep in digestibility crates", *Maydica*, 49, 115-126.
- 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, 71-86.
- BRUNSCHWIG P., LAMY J.M. (2001) : "Sources protéiques végétales alternatives au tourteau de soja pour l'alimentation des vaches laitières", *Rencontres Recherches Ruminants*, 8, 292.
- BRUNSCHWIG P., LAMY J.M., PEYRONNET C., CREPON K. (2004) : "Valorisation de la féverole dans des rations pour vaches laitières", *Rencontres Recherches Ruminants*, 11, 275.
- CHENOST M., MARTIN-ROSSET W. (1985) : "Comparaison entre espèces (mouton, cheval, bovin) de la digestibilité et des quantités ingérées des fourrages verts", *Ann. de Zootech.*, 34, 291-312.
- DE BOEVER J.L., COTTYN B.G., ANDRIES J.I., BUYSSE F.X., VANACKER J.M. (1988) : "The use of cellulase technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of forage", *An. Feed Sci. and Technol.*, 19, 247-260.
- DE BOEVER J.L., COTTYN B.G., DE BRABANDER D.L., VANACKER J.M., BOUCQUE C.V. (1997) : "Prediction of the feeding value of maize silages by chemical parameters, in vitro digestibility and NIRS", *An. Feed Sci. and Technol.*, 66, 221-222.
- DEINUM B., STEG A., HOF G. (1984) : "Measurement and prediction of digestibility of forage maize in the Netherlands", *An. Feed Sci. and Technol.*, 10, 301-313.
- DEMARQUILLY C., CHENOST M., GIGER S. (1995) : "Pertes fécales et digestibilité des aliments et des rations", *Nutrition des ruminants domestiques ingestion et digestion*, Editeurs R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M-H. Farce, M. Journet, INRA Editions, 601-647.
- DERIEUX M., DARRIGAND M., GALLAIS A., BARRIERE Y., BLOC Y., MONTALANT Y. (1987) : "Estimation du progrès génétique réalisé chez le maïs grain en France entre 1950 et 1985", *Agronomie*, 7, 1-11.
- DULPHY J.P., DEMARQUILLY C., HENRY M. (1975) : "Perte de composés volatils lors de la détermination à l'étuve de la teneur en matière sèche des ensilages", *Ann. de Zootech.*, 24, 743-756.
- DULPHY J.P., DEMARQUILLY C. (1981) : "Problèmes particuliers liés aux ensilages", *Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants*, INRA éditeur, 81-104.
- EMILE J.C., HUYGHE C., HUGUET L. (1991) : "Utilisation du lupin blanc doux pour l'alimentation des ruminants : résultats et perspectives", *Ann. de Zootech.*, 40, 31-44.
- FROIDMONT E., BARTIAUX-THILL N. (2003) : "Utilisation du lupin et du pois en substitution partielle du soja dans l'alimentation des vaches laitières hautes productrices", *Actes des journées de l'AFPF*, 150-151.
- GALLAIS A., HUGUET L., BERTHET H., BERTIN G., BROQUA B., MOURGET A., TRAINÉAU R. (1980) : "Preliminary evaluation of brown midrib maize hybrids for their feeding and agronomic value in France", W.G. Pollmer and R.H. Phipps (Eds), *Improvement of quality traits of maize for grain and silage use*, M. Nijhoff Publishers, 319-339.
- GALLAIS A. (2002) : "Progrès génétique chez le maïs", *Le Sélectionneur Français*, 53, 23-33.
- GOERING H.K., VAN SOEST P.J. (1971) : *Forage fiber analysis (apparatus, reagents, procedures, and some applications)*, Agric. Handb 379. US Gov. Print Office, Washington DC.
- LAUER J.G., COORS J.G., FLANNERY P.J. (2001) : "Forage yield and quality of corn cultivars developed in different eras", *Crop Science*, 41, 1449-1455.
- MORAN J.B., LEMERLE C., TRIGG T.E. (1988) : "The intake and digestion of maize silage-based by dairy cows and sheep", *An. Feed Sci. and Technol.*, 20, 239-312.

- ROOK J.A., MULLER L.D., SHANK D.B. (1977) : "Intake and digestibility of brown midrib corn silage by lactating dairy cows", J. of Dairy Science, 60, 1894-1904.
- SOMMERFELDT J.L., SCHINGOETHE D.J., MULLER L.D. (1979) : "Brown midrib corn silage for lactating dairy cows", J. of Dairy Science, 62, 1611-1618.
- TRAINEAU R. (1991) : "Mise au point d'un matériel de récolte et de confection de silos adaptés à des parcelles expérimentales", Fourrages, 128, 465-470.

SUMMARY

Genetic variation in the in vivo digestibility of maize hybrids. Assessment of 34 years of measurements

The feeding value of maize silage, which is equal to the product of the voluntary intake by the digestibility, is the main factor influencing the performance of livestock. It is necessary to study the sources of its variation and show the factors responsible for the quality of forage maize in order to breed to-morrow's cultivars. For 34 years, from 1958 to 2002, 2383 measurements of digestibility of maize silage were carried out on 478 hybrids at the INRA station in Lusignan. These measurements, made with standard castrated rams, concerned all types of hybrids : early heading, late heading, registered, experimental, and also bm3 mutants. Results show a very large variation in the energy value of the silages, linked to the hybrid utilized, and under the strong influence of cell-wall digestibility (CUD_{NDF}). On average, the energy value of maize is 0.89 UFL (fodder unit fort milk), but the measured values ranged from 0.74 to 1.01 UFL. Various comparisons showed for instance that the early-heading hybrids are more digestible than the late heading ones, and that the more recent cultivars are on average less digestible than the old ones. Lastly, new tools for the prediction of the *in vivo* digestibility of the organic matter, or of the NDF, should give the breeders the possibility of creating cultivars with better feeding values.