

Le maïs ensilage de demain, un maïs spécifique pour nourrir les ruminants

Y. Barrière^{1*}

Le maïs ensilage de demain devra permettre de réduire le coût des productions bovines, les intrants et le travail, avec des pratiques culturales préservant l'environnement. L'objectif du sélectionneur est de créer cette variété idéale de maïs ensilage, ou idéotype, qui rassemblerait toutes les caractéristiques agronomiques et alimentaires aux plus hauts niveaux.

RÉSUMÉ

Le maïs ensilage de demain sera une variété produisant une biomasse régulière en conditions d'intrants limités, apte à valoriser les effluents animaux, tolérante aux basses températures, avec une résistance élevée à la verse et un ancrage racinaire de qualité. Dans un milieu donné, c'est la valeur du génotype qui conditionne pour l'éleveur la valeur de l'ensilage. Aussi, ces maïs ensilage spécifiques auront-ils été sélectionnés pour leur valeur alimentaire (mesure de la digestibilité de la plante entière et des parois et mesure de la teneur en amidon). La variabilité de l'ingestibilité devra être prise en compte. La valeur énergétique des meilleures variétés devra être de 0,95 UFL/kg de maïs ensilage.

* avec la collaboration de O. Argillier¹, J. C. Emile¹, B. Michalet-Doreau², M. Champion³, Y. Hébert¹, E. Guingo¹, C. Giauffret⁴

MOTS CLÉS

Digestibilité, ensilage, évolution, facteur climat, ingestibilité, maïs, production fourragère, progrès génétique, sélection variétale, valeur alimentaire, valeur azotée.

KEY-WORDS

Climatic factor, cultivar breeding, digestibility, evolution, feeding value, forage production, genetic progress, maize, nitrogen value, silage, voluntary intake.

AUTEURS

- 1 : I.N.R.A., Station d'Amélioration des Plantes Fourragères, F-86600 Lusignan.
- 2 : I.N.R.A., Station de Recherche sur la Nutrition des Herbivores, F-63122 Theix.
- 3 : SEPROMA, 3, Avenue Marceau, F-75116 Paris.
- 4 : I.N.R.A., Station d'Amélioration des Plantes, F-80200 Estrées-Mons.

La culture du maïs ensilage s'est fortement développée depuis l'apparition des premières variétés précoces et tolérantes aux basses températures comme Inra258, puis LG11. Actuellement, plus de 3 500 000 ha de maïs ensilage sont cultivés dans la moitié nord de l'Europe. Ceci est dû aux atouts de cette culture qui permet aux éleveurs de disposer d'une ration de base à forte valeur énergétique, facile à produire et à conserver, et bien consommée par les troupeaux bovins.

Face à un élevage en crise, l'ensemble de la filière, et en particulier l'amélioration des plantes, doit s'organiser pour mettre à la disposition des éleveurs des méthodes et du matériel végétal qui permettent la production de lait et de viande de qualité répondant aux attentes des consommateurs, et qui permettent aussi la réduction des coûts en intrants de toute nature. Cette nouvelle approche de l'élevage doit de plus contribuer à l'amélioration des conditions de travail, à la préservation de l'environnement et à l'occupation de l'ensemble de l'espace rural, sans laisser de régions à l'écart du développement. Ce nouveau mode d'élevage à mettre en place devra enfin être compatible et durable avec des primes et des soutiens en diminution dans une économie de plus en plus déréglementée.

L'utilisation de l'herbe pâturée sera un facteur majeur de réduction des coûts alimentaires des animaux avec, à ce jour, un coût de l'UFL de 2 à 3 fois moins cher que celui d'une UFL d'ensilage d'herbe ou de maïs (hors primes). Comparé à l'herbe pâturée, le coût supérieur de l'UFL de maïs ensilage est lié au caractère annuel de la culture, ainsi qu'aux coûts de récolte et stockage, sachant que la récolte pose aussi le problème d'une période de fort surcroît de travail. En revanche, l'utilisation plus importante de l'herbe contraindra à adapter la conduite du troupeau à la disponibilité de l'herbe, en ayant pour objectif de maximiser les quantités ingérées par animal, sachant que la densité énergétique de l'herbe n'est que la moitié ou le tiers de celle d'un ensilage de maïs. Les stocks d'herbe sur pied ne peuvent répondre qu'à des besoins estivaux limités, d'autant que leur ingestibilité sera relativement faible. Par ailleurs, l'épandage des effluents animaux sur les prairies conduit à des risques sanitaires d'autant plus forts qu'une certaine désintensification aura conduit à diminuer la prophylaxie sur le troupeau. Dans ces conditions, **utiliser des hybrides modernes de maïs ensilage n'est pas synonyme d'intensification**, en particulier avec les nouveaux hybrides développés spécifiquement pour cette utilisation. **Mais c'est au contraire le facteur de sûreté de l'alimentation** en quantité, en qualité, et en régularité de la qualité des réserves alimentaires, permettant de minimiser les coûts alimentaires et de prendre en compte les aspects environnementaux.

L'objectif du sélectionneur de maïs ensilage sera ainsi d'obtenir des hybrides les meilleurs possibles pour les différentes caractéristiques qui sont présentées et discutées dans ce texte. La sélection sera faite par niveaux indépendants, pour tenter de rassembler au niveau le plus élevé ces différentes qualités, avec une hiérarchie de sélection de chacun des caractères dépendant du choix de l'obtenteur et de la variabilité génétique dont il dispose. L'éleveur, lui, choisira parmi les hybrides disponibles sur le marché celui qui présentera au niveau le

plus élevé la ou les caractéristiques qui lui sembleront les plus importantes pour son élevage, dans un contexte pédoclimatique donné.

Productivité et précocité du maïs ensilage

L'objectif d'une culture de maïs ensilage est d'obtenir, après la récolte, **un produit dont la teneur en matière sèche soit comprise entre 27 et 35%**, avec un optimum zootechnique plutôt compris entre 30 et 35%. Dans la mesure où les plantes sont récoltées avant le stade de maturité du grain, il est possible de cultiver pour l'ensilage, dans un milieu donné, des géotypes un peu plus tardifs que ceux qui seraient cultivés en grain. La précocité d'ensilage résulte d'une part de la teneur en grain et de la teneur en eau de ces grains, mais autant ou plus de la teneur en matière sèche du non grain.

L'augmentation de la productivité, à niveaux d'intrants et d'intensification constants ou en réduction, est une voie de réduction des coûts alimentaires des animaux. A ce titre, **les progrès en productivité ont été très importants** au cours des 11 années de fonctionnement du réseau CTPS ensilage. Estimé à partir des meilleures variétés inscrites avec la mention ensilage, le potentiel de production de biomasse des hybrides a augmenté de 0,17 t/ha/an, pour être ainsi proche de 18 t/ha, à une teneur en matière sèche voisine de 30%. Une nouvelle amélioration de la productivité est envisageable, puisque cette valeur est nettement inférieure à la limite théorique de l'espèce, liée aux possibilités d'interception et de conversion de l'énergie lumineuse.

Mais, autant que la valeur absolue de la productivité, **la stabilité de la productivité, à un niveau élevé, est une qualité essentielle**, en particulier dans le cadre d'une agriculture moins intensive. La sélection a déjà permis de progresser à ce niveau **puisque les variétés récentes apparaissent plus rustiques que les variétés plus anciennes** (TOLLENAAR *et al.*, 1994), avec une supériorité d'autant plus nette que les conditions de milieu sont plus difficiles. Ainsi, et contrairement à une idée largement répandue, cultiver des variétés modernes de maïs n'est pas synonyme d'intensification. Le progrès génétique réalisé a en fait permis d'accumuler **des systèmes génétiques de résistance aux stress qui permettent aux plantes de maintenir un potentiel de production en conditions défavorables**.

Résistance du maïs ensilage à la verse

La résistance à la verse en végétation, facteur de régularité et de qualité de la production, et facteur contribuant à un coût minimal de la récolte, est un critère de sélection important des variétés de maïs à vocation d'ensilage. La verse en végétation résulte du pivotement de la base de la plante sous l'effet du vent dans des

conditions de sol humide. Il y a une liaison entre la résistance à la verse en végétation et le nombre de racines sur certains entre-nœuds, le diamètre des racines et la direction de croissance des racines par rapport à l'horizontale. Des compensations peuvent intervenir entre les différentes caractéristiques impliquées, avec des effets de seuil, conduisant à un comportement des plantes au champ similaire pour des mécanismes génétiques différents (HÉBERT *et al.*, 1992, 1996).

Des progrès très importants en résistance à la verse en végétation ont été réalisés depuis 1990, à partir de notations de résistance phénotypique dans des milieux particulièrement exposés. **Des hybrides extrêmement résistants ont ainsi été inscrits**, présentant moins de 1% de plantes versées quand les témoins classiques étaient versés à plus de 30%. Toutefois, certaines variétés très résistantes s'avèrent de faible ou très faible valeur alimentaire alors que, réciproquement, des variétés de bonne valeur alimentaire peuvent s'avérer sensibles à la verse. Ceci peut être dû à une dérive aléatoire, la valeur alimentaire n'étant pas simultanément prise en compte au cours de la sélection, ou bien être dû à une liaison négative entre les caractères, mais différents travaux montrent qu'**il est possible de progresser à la fois en tenue de tiges et en valeur alimentaire** (MELCHINGER *et al.*, 1986 ; ARGILIER *et al.*, 1995 ; HÉBERT *et al.*, 1996). La pression de sélection pour la résistance à la verse sera donc simultanée à des mesures de valeur alimentaire, pour éviter tout risque de dérive sur un caractère ou l'autre.

Tolérance au froid du maïs ensilage

Le principal facteur limitant la production de maïs précoces cultivés dans la moitié nord de l'Europe **est leur capacité insuffisante à croître à des températures fraîches**. Ceci conduit à la fois à des semis de milieu de printemps et à une croissance lente des plantes en début de végétation. En conséquence, il y a une absorption insuffisante par le couvert du rayonnement solaire utile à la photosynthèse, et l'indice foliaire (LAI) maximum n'est atteint que lorsque le rayonnement solaire est nettement décroissant. De plus cet indice, voisin de 3, ne permet pas l'efficacité maximale d'interception. Parmi les caractères déterminants la mise en place du LAI, la vitesse d'allongement foliaire est celui qui présente la sensibilité à la température la plus grande, et la variabilité génétique la plus large. La tolérance aux basses températures est aussi l'aptitude des plantes à retrouver rapidement des capacités photosynthétiques après un stress froid. Des semis plus précoces, grâce à une meilleure adaptation aux faibles températures, permettraient aussi une floraison plus précoce, à une période de moindre risque de stress hydrique, et fiabiliseraient les prélèvements d'azote par la culture en stabilisant la productivité.

Si les sources de variabilité pour la tolérance aux basses températures ont d'abord été trouvées dans les maïs à grain corné d'origine européenne (Lacaune, en particulier), la progression vers un idéotype de maïs ensilage précoce tolérant au froid pour la moitié nord de l'Europe devra **faire appel à d'autres ressources génétiques. Ainsi,**

certains écotypes tropicaux d'altitude (2 000-3 000 m) ont, en conditions froides, une levée plus rapide, un système foliaire mieux et plus rapidement développé, et une production de matière sèche en fin de cycle plus importante. **La tolérance au froid comporte aussi une composante parasitaire** au sens où des attaques de *Pythium arrhenomanes-graminicola* ou de *Fusarium roseum* peuvent accentuer les dégâts de froid en début de végétation.

Valorisation des intrants par le maïs ensilage

La tolérance au stress hydrique fait partie des critères implicites de sélection du maïs ensilage, comme facteur de la production et de sa régularité. Elle devra faire l'objet d'une prise en compte plus explicite avec, en particulier, une approche de la variabilité génétique du système racinaire. Le sorgho, qui est plus apte à prélever l'eau et l'azote du sol, a aussi un système racinaire plus développé que le maïs (LEMAIRE *et al.*, 1996).

L'aptitude à valoriser la fertilisation azotée est un enjeu important pour une maîtrise des atteintes à l'environnement. La variabilité de l'absorption de l'azote se rattache sans doute autant à la variabilité de la croissance racinaire et à l'aptitude à trouver l'eau, qu'à une variabilité intrinsèque des capacités d'absorption de la plante. Les fuites de nitrate sous les cultures de maïs sont liées à une gestion déficiente de la fertilisation, avec une surestimation des besoins de la plante, une sous-estimation de la valeur azotée des effluents animaux apportés, et une utilisation irrationnelle des surfaces en maïs comme surfaces d'épandage de ces effluents. Compte tenu de l'évolution des besoins en azote de la plante, qui sont particulièrement importants entre la mi-juin et la mi-août, le maïs est déjà une culture tout à fait apte à valoriser l'azote libéré par la minéralisation de la matière organique des effluents animaux. Avec une ration à base de maïs ensilage, les restitutions azotées par les déjections suffisent pratiquement à couvrir les besoins azotés (et phospho-potassiques) de la culture de maïs ensilage. Les travaux de LE GALL *et al.* (1996) en France et de VAN KEULEN *et al.* (1996) aux Pays-Bas montrent que les rejets d'azote par vache sont plus faibles avec les animaux nourris à l'ensilage de maïs qu'avec une alimentation à l'herbe. En revanche, une bonne gestion des apports de lisier sur maïs impose des investissements en stockage et matériel d'épandage des déjections, en particulier pour éviter les pertes par volatilisation. Il faut veiller aussi à une couverture des sols derrière les cultures de maïs pour éviter les fuites de nitrate, problème que l'on retrouve aussi de façon exacerbée lors du retournement des prairies. Si un idéotype de maïs ensilage pouvait être une plante apte à valoriser de faibles fertilisations azotées réparties dans de larges horizons de sol, **une plus forte capacité de la plante à absorber de l'azote des fumiers et lisiers aurait des intérêts zootechniques, économiques et écologiques**. Une absorption d'azote plus forte pourrait ainsi conduire à une teneur en azote supérieure du maïs en plan-

te entière, et des valeurs de 10 à 11% de Matières Azotées Totales dans l'ensilage seraient en effet tout à fait adaptées à l'alimentation des vaches laitières, limitant les achats extérieurs de matières protéiques et valorisant des effluents largement disponibles.

Autres contraintes agronomiques pour le maïs ensilage

La tolérance aux parasites est prise en compte avec la résistance aux pourritures de tiges et d'épis, aux maladies foliaires et aux charbons. **Le staygreen, aptitude des plantes à maintenir un état vert durant la période de remplissage et de dessiccation du grain, est une voie indirecte d'amélioration** des qualités mécaniques, de la productivité et de l'état sanitaire. La limite à un fort staygreen ne pourrait être qu'un effet défavorable sur la teneur en matière sèche du non grain. Dans les zones de culture pour l'ensilage, le maïs est en fait une plante qui ne nécessite que très peu d'interventions phytosanitaires, si ce n'est le traitement du sol et le désherbage. **Un bon respect des pratiques agronomiques permet de réduire la pression des ravageurs et des mauvaises herbes.** Les traitements chimiques de la culture demeurent toutefois nécessaires, mais les doses employées ont été notablement réduites et la recherche d'autres voies de gestion des parasites et concurrents se poursuit. Dans les rares zones de maïs ensilage concernées, la tolérance à la pyrale est envisagée par la recherche de résistances génétiques et/ou par lutte biologique avec *Bacillus thuringiensis*.

Valeur azotée du maïs ensilage

Le maïs ensilage se caractérise par une faible teneur en protéines, facilement corrigée par de l'urée ou des protéagineux. Les valeurs moyennes de teneur en MAT (N x 6,25) et en PDIE, pour les 126 hybrides précoces inscrits étudiés à Lusignan avec les moutons standards, se situent respectivement à 8,2% et 67 g/kg. Les teneurs en MAT et en PDIE sont indépendantes de la teneur en grain ($r = -0,04$). En raison d'une variance génétique particulièrement faible, même en incluant des hybrides expérimentaux de même précocité, l'héritabilité au sens strict de la teneur en MAT ou en PDI est très faible, inférieure à 0,20. **Les progrès à attendre sur la teneur en MAT, à partir des bases génétiques classiques, sont donc limités.**

Lors de l'estimation de la valeur PDI du maïs ensilage, la dégradabilité ruminale des MAT (DT = 0,72) et la digestibilité intestinale des acides aminés alimentaires (dr = 0,70) sont supposées constantes, faute d'avoir pu les estimer pour chaque hybride. Pour estimer les possibilités de sélection et de progrès sur la valeur PDIE, **une investigation de la variabilité génétique de la dégradabilité de l'azote dans le rumen reste à faire**, variabilité qui pourrait être importante, l'impact de la digestibilité intestinale des acides aminés étant beaucoup

plus faible. Il serait alors possible d'élaborer des rations plus ajustées en PDI et donc, avec une approche similaire sur les compléments, d'éviter aux bovins d'être en excès d'apports protéiques qui conduisent à des rejets azotés notables.

La complémentation azotée indispensable de l'ensilage de maïs est aussi raisonnée pour combler les déficits en acides aminés limitants. Ceci conduit souvent à un excès d'apport de MAT, responsable également de rejets azotés dans le milieu. Actuellement, **une modification de la composition en acides aminés du maïs n'est sans doute pas une voie très réaliste**. L'utilisation d'acides aminés protégés est une voie pour ceux qui sont économiquement disponibles après synthèse industrielle ou bactérienne.

Composition des parois d'une plante de maïs ensilage

Les parois sont constituées essentiellement d'une structure fibrillaire cellulosique, noyée dans une matrice de composés phénoliques (lignines, acides hydroxycinnamiques) et d'hémicelluloses. **La teneur en lignine est le facteur limitant principal de la dégradabilité de ces parois, mais d'autres facteurs influencent la digestibilité de ces parois** comme la composition biochimique de cette lignine, la nature des liaisons entre les alcools cinnamyls constitutifs, la nature des acides cinnamiques qui sont liés à la lignine et la fréquence des ponts réalisés par l'acide férulique entre la lignine et les hémicelluloses. Outre ces caractéristiques biochimiques de la lignification, la répartition spatiale des tissus lignifiés contribue probablement à la variabilité de digestibilité des structures pariétales. Pour un maïs ensilage de bonnes valeurs agronomique et alimentaire, le polymorphisme des enzymes liées à la lignification, la variabilité des gènes de régulation correspondants, sont sans doute à la source d'une variabilité plus intéressante que des systèmes de tout ou rien comme cela est précisément le cas avec les mutants bm3. **L'utilisation de stratégies d'extinction partielle de gènes en insertion sens ou antisens est une voie possible, tout particulièrement pour la compréhension des mécanismes**. Ainsi, BERNARD-VAILHÉ (1995) a montré sur le tabac que les augmentations de digestibilité des parois, après transformation antisens ou sens éteint avec le gène de l'O-Méthyl-Transférase, étaient surtout liées à des modifications de composition de la lignine. La recherche sur la qualité des parois de l'idéotype de maïs ensilage doit donc se fonder sur des approches beaucoup plus fines et plus complexes que de simples teneurs en lignine.

Teneur et composition du grain du maïs ensilage

Comparé aux plantes fourragères classiques, le maïs se différencie par la présence de grain dans l'ensilage, ce qui conduit à un four-

rage mixte contenant à la fois des glucides de réserve et des glucides structuraux. Le grain est à la fois un facteur de valeur énergétique, un facteur de densité énergétique, mais aussi un facteur de régularité de la valeur énergétique de la biomasse récoltée qui n'évolue pas entre la floraison et la maturité ensilage, alors que c'est une difficulté majeure rencontrée au cours de la croissance des plantes fourragères classiques. **La vitesse et le site de digestion de chacune des deux fractions, amylicée pour le grain, hémicellulosique et cellulosique pour la tige et les feuilles, sont différents.** Si la digestion de la fraction pariétale a lieu principalement dans le rumen, la digestion de la fraction amylicée, très élevée sur l'ensemble du tube digestif, se répartit entre rumen, intestin grêle et gros intestin, avec une nature des produits de la digestion, et donc une utilisation métabolique par l'animal, différente suivant le site. De plus, la digestion d'une quantité importante d'amidon dans le rumen, qu'il provienne de la fraction "grain" de l'ensilage de maïs ou des concentrés, entraîne un déplacement de l'équilibre des populations microbiennes. **L'activité amylolytique de l'écosystème microbien augmente au détriment de l'activité cellulolytique, entraînant une diminution de la digestion ruminale des parois végétales.**

L'amidon de maïs se caractérise, par rapport à celui de céréales comme le blé ou l'orge, **par sa vitesse de dégradation ruminale plus faible.** La quantité d'amidon d'origine alimentaire qui échappe à la dégradation microbienne est ainsi en moyenne plus importante et sa part peut être appréciée par des méthodes *in situ* (SAUVANT *et al.*, 1994) ou *in vitro* (OPATPATANAKIT *et al.*, 1995). Ces parts respectives de la diges-

Hybride*	Année inscription	Précocité*	Nb de silos	UFL		DMO		DCB	
				UFL	int.conf.*	DMO	int.conf.*	DCB	int.conf.*
Rh184	1991	DP	4	0,79	0,03	65,1	1,9	45,4	5,0
Rh161	1989	DP	4	0,79	0,03	65,2	1,9	47,0	5,2
Rh228	1994	TP	3	0,83	0,04	66,5	2,2	42,4	5,8
Rh162	1990	DP	17	0,84	0,02	67,7	1,0	46,3	2,7
Rh206	1991	P	4	0,86	0,03	68,5	1,9	47,2	5,1
Rh188	1989	P	4	0,86	0,03	68,8	1,9	52,4	5,1
Rh247	1994	P	2	0,87	0,05	68,8	2,7	49,2	7,1
Rh243	1995	P	2	0,89	0,05	69,0	2,7	43,6	7,1
Rh207	1993	TP	7	0,90	0,03	70,3	1,5	57,0	4,0
Bahia	1992	P	6	0,90	0,03	70,8	1,6	50,9	4,2
LG11	1970	P	74	0,90	0,01	70,8	0,5	52,8	1,3
Rh185	1994	P	8	0,91	0,02	70,9	1,4	50,7	3,7
Dk250	1986	P	11	0,91	0,02	71,0	1,2	51,9	3,2
Dea	1980	DP	32	0,91	0,02	71,3	0,7	52,7	2,0
DK265	1987	P	11	0,91	0,03	71,3	1,2	54,5	3,1
Rh246	1996	TP	2	0,91	0,05	71,3	2,7	59,3	7,1
Brutus	1978	P	6	0,91	0,03	71,6	1,6	54,6	4,3
Rh212	1994	P	6	0,92	0,03	71,2	1,6	50,4	4,3
Moreno	1994	P	2	0,92	0,07	71,6	2,7	60,0	7,1
Lxis	1985	P	16	0,93	0,02	72,3	1,0	55,2	2,7
Inra258	1958	P	44	0,93	0,01	72,6	0,6	58,0	1,5
Rh174	1991	TP	4	0,93	0,03	72,8	1,9	49,3	3,5
Rh263	1993	DP	2	0,95	0,05	73,4	3,7	55,7	7,1
Eperon	1987	DP	8	0,95	0,02	73,5	1,4	51,1	3,7

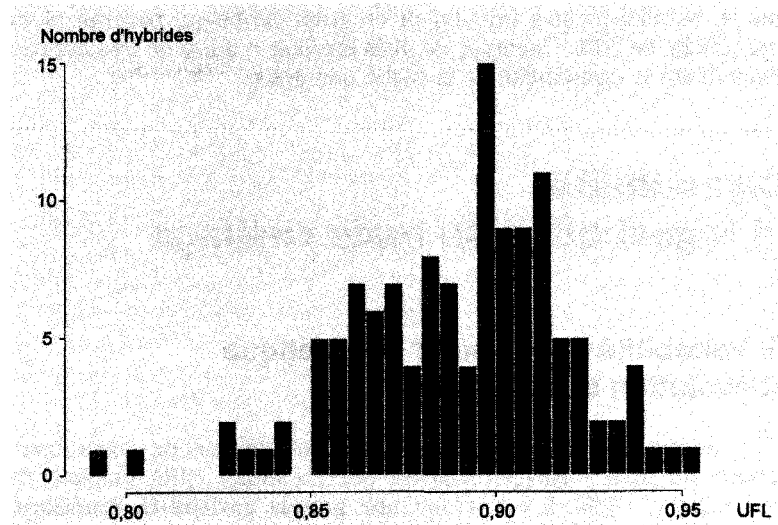
* Rh : hybride inscrit (*registered hybrid*) ; TP : très précoce, DP : demi précoce, P : précoce ;
int.conf. : intervalle de confiance à 5% (*confidence limit 5%*)

TABLEAU 1 : Illustration, avec quelques maïs hybrides, de la variabilité de la valeur énergétique (UFL), de la digestibilité de la matière organique (DMO) et de la cellulose brute (DCB) mesurées avec des moutons standards (données INRA Lusignan).

TABLE 1 : Variations in feed units for lactation (UFL), in organic matter digestibility (DMO) and crude fibre digestibility (DCB) of a few maize hybrids, estimated from measurements with standard sheep (data from INRA, Lusignan).

FIGURE 1 : Histogramme de fréquence des hybrides précoces inscrits entre 1958 et 1996 selon leur valeur énergétique UFL mesurée avec des moutons standards (données INRA Lusignan sur 126 hybrides précoces).

FIGURE 1 : *Frequency of maize hybrids registered between 1958 and 1996, according to their energy value (FU for lactation), as measured on standard sheep (data from INRA, Lusignan on 126 early-maturing hybrids).*



tion ruminale et intestinale de la fraction "grain" de l'ensilage de maïs peuvent varier de façon importante selon le génotype et le type de grain, à un niveau de maturité donné (PHILLIPEAU et MICHALET-DOREAU, 1996). Une étude plus systématique de cette variabilité permettrait de mettre à la disposition des éleveurs des hybrides de maïs ensilage limitant, par les caractéristiques de l'amidon, les interactions digestives.

Des essais ont été réalisés pour préciser la teneur en grain souhaitable d'un ensilage de maïs en éliminant, le jour de l'ensilage, le quart des épis dans des grandes parcelles destinées à l'alimentation de bovins. Ceci a permis d'obtenir des ensilages appauvris en grain de 6 points environ, mais avec des caractéristiques du non-grain identiques, distribués avec une complémentation énergétique et azotée raisonnée sur une base classique, par rapport à l'ensilage normal (BARRIÈRE et EMILE, 1990 ; EMILE et BARRIÈRE, 1992). Les résultats avec des vaches laitières et des jeunes bovins en croissance montrent que les deux types d'ensilage ont été ingérés et valorisés de façon proche, sauf pour un essai d'engraissement avec un hybride de faible valeur énergétique (0,75 UFV, 43,6% de grain dans l'ensilage normal) conduisant à une chute des Gains Moyens Quotidiens.

En alimentation bovine, et avec des ensilages de maïs ainsi complémentés de façon classique, **un idéotype de maïs ensilage devrait donc être apte à maintenir une teneur en grain voisine de 46%, soit 30% d'amidon**, dans les différentes conditions de milieu. Cette valeur devrait être affinée en fonction de la quantité d'amidon dégradable dans le rumen, qui dépend de la nature des compléments et de la dégradabilité propre de l'amidon du grain immature. Toutefois, **cette valeur est relative à la complémentation utilisée**. Dans une agriculture désintensifiée, avec une distribution minimale de concentrés et avec l'objectif d'utiliser le fourrage maïs pour couvrir presque à lui seul tous les besoins énergétiques de l'animal, l'idéotype de maïs ensilage devra avoir une quantité d'amidon, d'une qualité définie, qui optimise la valeur énergétique de cette ration. Ceci ne sera possible

que si, parallèlement à une teneur en grain élevée qui pourrait alors être proche de 50%, l'idéotype de maïs ensilage a aussi de très bonnes ingestibilité et digestibilité de la partie non grain.

Digestibilité et ingestibilité du maïs ensilage

■ Variabilité de la valeur énergétique et évolution depuis 1958

Autour des valeurs de référence de digestibilité et de valeur énergétique du maïs ensilage, données par les tables INRA (ANDRIEU et DEMARQUILLY, 1988), il y a en fait **une grande variabilité génétique avec des digestibilités et des valeurs énergétiques** comprises respectivement entre 65,1 et 73,5%, et 0,79 et 0,95 UFL/kg (tableau 1 et figure 1, résultats INRA Lusignan avec des moutons standards sur 126 hybrides précoces inscrits entre 1958 et 1996). Environ 33% des hybrides étudiés avaient une valeur énergétique respectivement inférieure ou égale à 0,88 UFL, et 40 et 13% avaient une valeur respectivement supérieure ou égale à 0,90 et 0,92 UFL. Parmi les hybrides inscrits depuis 1989, représentatifs du matériel génétique disponible aujourd'hui pour l'éleveur, 47% des hybrides avaient une valeur énergétique égale ou inférieure à 0,88 UFL, et seulement 25 et 7% avaient une valeur supérieure ou égale à 0,90 et 0,92 UFL. En comparant dans un même lieu la valeur énergétique moyenne des hybrides utilisés pour construire les tables (0,926 UFL), à celle des hybrides inscrits depuis 1989 (0,878 UFL ; tableau 2), **la diminution de valeur moyenne entre les hybrides des générations 1970 et 1990 peut donc être estimée à 0,048 UFL/kg**, ce qui représente environ 1,7 kg de lait aux normes pour des vaches laitières recevant une alimentation classique à base d'ensilage de maïs.

■ Forte variabilité de la valorisation animale

La variabilité génétique de la valeur énergétique du maïs ensilage est aussi mise en évidence au travers des variations des perfor-

	Nb d'hybrides	UFL	Grain (%)
3 hybrides de référence*	3	0,926	42,3
Hybrides inscrits de 1958 à 1988	58	0,902	42,6
Hybrides inscrits en 1989 ou après	60	0,878	44,8
Ensemble des hybrides étudiés, inscrits entre 1958 et 1996	118	0,890	43,7

* Inra258, Funk245, LG11 : hybrides utilisés par ANDRIEU et DEMARQUILLY (1988) pour établir les valeurs de référence ; hybrids used in the reference book for animal nutrition, by ANDRIEU and DEMARQUILLY (1988).

TABLEAU 2 : Valeur énergétique et teneur en grain moyennes des hybrides de maïs en fonction de leur époque d'inscription .

TABLE 2 : Average energy feeding values and grain contents according to date of registration of the hybrids (digestibility measurements on sheep at Lusignan).

TABLEAU 3 : Performances zootechniques de vaches laitières alimentées avec différents hybrides de maïs sous forme d'ensilage (synthèse de 3 essais réalisés à l'INRA Lusignan).

TABLE 3 : *Milk yield and milk quality from dairy cows fed various silage maize hybrids (synthesis of 3 trials at INRA, Lusignan).*

	Essai 1 (97 jours)			Essai 2 (105 j)		Essai 3 (105 jours)		
	Rh162	Brutus	Dk265	Rh162	Inra258	Rh162	Rh208	Dk265
% grain maïs	46,3	46,7	46,2	42,5	40,0	49,3	51,7	54,3
% MS maïs	37,1	37,1	36,8	31,2	29,5	32,9	31,7	33,4
Ingéré maïs (kg)	15,9	16,2	17,6	14,0	14,5	16,7	16,3	17,9
Ingéré luzerne (kg)	0,0	0,0	0,0	4,4	4,4	0,0	0,0	0,0
Concentrés (kg)	4,1	4,1	4,1	2,1	2,1	4,5	4,5	4,5
Lait à 4% (kg)	28,6	29,6	29,5	28,5	29,5	27,5	29,1	30,6
Gain de poids (g/j)	229	302	565	62	267	263	190	250
Valorisation du maïs ingéré (UFL)	15,6	16,7	17,4	14,1	15,5	16,0	16,3	17,5
UFL moutons standards	0,84	0,91	0,91	0,84	0,93	0,84	0,91	0,91

mances zootechniques de taurillons ou de vaches laitières, même si le maïs n'est pas le seul fourrage de la ration (ISTASSE *et al.*, 1990 ; Ciba-semences, 1990 ; CARPENTIER *et al.*, 1995 ; BARRIÈRE *et al.*, 1995a, 1995b ; EMILE *et al.*, 1996). Tous les autres facteurs étant par ailleurs égaux, **les productions de lait à 4% des vaches laitières peuvent différer de 1 à 3 kg (tableau 3) et les écarts de gain de croît des taurillons peuvent atteindre 100 g/jour** quand les animaux sont alimentés avec des hybrides de faible ou bonne digestibilité.

Des différences d'ingestibilité importantes, supérieures à 1 kg, sont aussi mises en évidence. Ainsi, l'hybride Dk265 est mieux ingéré que les autres, y compris que des hybrides *a priori* meilleurs en digestibilité comme Inra258. Une ingestibilité supérieure a été aussi mise en évidence par Ciba-semences avec les hybrides apparentés Briard et Bahia. **Un hybride très bien ingéré apparaît aussi moins bien valorisé par les vaches laitières, à complémentarité égale, l'excédent d'énergie disponible étant seulement en partie utilisé sous forme d'une reprise de poids supérieure.** De tels hybrides n'expriment en fait leur potentiel que dans le cas où la complémentarité énergétique est réduite, d'une valeur proche de celle correspondant au supplément d'ensilage ingéré, comme cela avait été précédemment observé avec les hybrides à nervures brunes bm3, également de bonnes digestibilité et ingestibilité (HODEN *et al.*, 1985). Dans une agriculture désintensifiée, l'animal devra s'adapter au cours de l'année à la disponibilité en herbe et en fourrages, avec en particulier des périodes de sous-alimentation. La possibilité qu'auront les animaux de reprendre du poids au cours d'une période d'alimentation à l'ensilage de maïs, avec des hybrides très ingestibles, très digestibles et très énergétiques est ainsi un atout essentiel de l'idéotype de maïs fourrage. C'est, de même, **avec ce type de génotype très énergétique qu'il sera possible de diminuer de façon très importante la quantité de concentrés.**

■ Dans un milieu donné, le choix de l'hybride conditionne la valeur énergétique de l'ensilage

Les effets des milieux ou des années sur la digestibilité ou la valeur énergétique sont importants. En revanche, **les interactions**

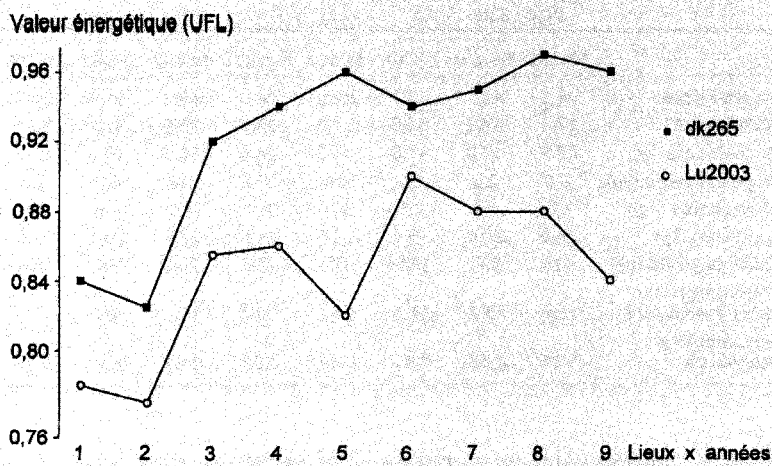


FIGURE 2 : Valeur énergétique (mesurée sur des moutons standards à l'INRA de Lusignan) de 2 hybrides cultivés dans 9 environnements différents.

FIGURE 2 : Energy value (FU for lactation) of 2 maize hybrids grown in 9 different environments, as measured on standard sheep at INRA, Lusignan.

génotype x milieu sont faibles par rapport à l'effet du génotype. L'effet du génotype est de 9 à 16 fois plus élevé, au sens statistique, que celui de l'interaction génotype x milieu. A titre d'illustration, la figure 2 présente la comparaison de deux hybrides variables en valeur énergétique sur 9 milieux - années. Dans tous les environnements étudiés, l'hybride connu pour avoir la plus faible valeur énergétique dans un lieu est aussi le plus faible sur tous les lieux. Ce résultat a été confirmé sur une gamme plus large d'hybrides et de milieux (données *in vivo* INRA Lusignan, ARGILLIER *et al.*, 1997). Dans un milieu donné, c'est la valeur de l'hybride qui conditionne pour l'éleveur la valeur de l'ensilage et donc les productions animales.

■ Des progrès à attendre en valeur alimentaire pour réduire la complémentation

L'étude des corrélations génétiques montre aussi que la valeur UFL est plus liée à la digestibilité de la cellulose brute ($r = 0,77$) qu'à la teneur en grain ($r = 0,59$), bien que le grain représente environ 45% de la matière sèche de la plante entière et soit pratiquement complètement digéré sur l'ensemble du tube digestif, alors que la teneur en cellulose brute n'en représente que 20%. L'héritabilité de la valeur UFL au niveau du génotype est élevée (0,85), ce qui permet de progresser significativement sur ce critère. **Une amélioration de la valeur énergétique de 0,06 UFL/kg, ou une amélioration de l'ingestibilité de 1 kg,** conduisent de la même façon à une augmentation de 0,90 UFL de l'énergie apportée par une ration de 16 kg de maïs ensilage. Ces deux caractéristiques **doivent donc être simultanément des objectifs de sélection du maïs ensilage et la marge de progrès paraît importante.**

Critères *in vitro* de la valeur alimentaire du maïs ensilage

■ Un nouveau critère de digestibilité pour les plantes entières et les parois

Pour être d'utilisation facile et de coût limité dans un grand réseau expérimental, un critère de sélection *in vitro* de la digestibilité du maïs doit pouvoir être estimé sur des échantillons de plantes entières. Il doit aussi avoir été validé par des essais avec des animaux. Actuellement, il s'avère que ce sont **les solubilités enzymatiques incluant une amylase**, réalisées sur des échantillons de plantes entières et prédites dans le proche infrarouge, qui **sont à la base des critères les plus pertinents**. Pour séparer les hybrides qui, à solubilité égale, ont des teneurs en grain et des digestibilités de parois différentes, il est souhaitable de calculer un indice de digestibilité des parois. DOLSTRA et MEDEMA (1990) ont proposé une digestibilité calculée du NDF, sous l'hypothèse que le non-NDF est complètement digestible. A partir de prédictions de la solubilité enzymatique des plantes entières, de leur teneur en amidon et de leur teneur en glucides solubles, ARGILLIER *et al.* (1995, 1996) ont récemment proposé **le critère DINAG**, digestibilité de la partie " non-amidon non-glucides solubles " (annexe 1). Ce critère **présente l'avantage de mettre à disposition des utilisateurs les trois valeurs clés d'un hybride de maïs ensilage, à savoir sa digestibilité en plante entière, sa teneur en amidon et la digestibilité de sa partie "non-grain"**.

La principale limite à l'utilisation de ces équations est la qualité de la prise d'échantillons. Les résultats les plus satisfaisants sont obtenus dans des dispositifs structurés permettant une interprétation statistique des données, comme c'est le cas au cours des programmes de sélection. **L'utilisation chez l'éleveur est plus délicate et dépendante de la qualité de l'échantillonnage** dans les remorques ou les silos. Des mesures répétées faites à l'INRA de Lusignan laissent penser qu'il n'est possible d'approcher la digestibilité ou la valeur énergétique d'un ensilage d'une variété de maïs que si les estimations sont faites sur au moins 10 (et plutôt 15) échantillons représentatifs de la parcelle ou du silo. Une solution possible chez l'éleveur serait alors d'utiliser une valeur de référence pour chaque variété et de mettre au point des outils liés au milieu pédoclimatique pour estimer les effets "milieu" et "silo" sur cette valeur de référence.

La variabilité génétique pour la digestibilité des parois est importante. En récapitulant les données de la bibliographie, la plus faible valeur de digestibilité du NDF des tiges semble proche de 2% (lignée LAN496, LUNDVALL *et al.*, 1994) et la plus forte valeur de digestibilité de parois de type DINAG est autour de 72% (lignée F7012, ARGILLIER, non publié). La digestibilité des parois du matériel génétique disponible pour la création d'hybrides précoces se situe classiquement entre 58 et 72%, celle des lignées effectivement utilisées se situant entre 63 et 67% (critère DINAG). Si certaines des lignées de maïs

devra être du type de celui de Dk300, avec une aptitude à s'enraciner et à prélever l'eau et l'azote comme celle de sorghos élités. Les qualités mécaniques optimales des tiges restent à préciser en fonction du développement du système racinaire et de la valeur alimentaire des tiges, de même que le niveau optimal de *staygreen* reste à définir. Avec une alimentation " traditionnelle " des animaux, comprenant un apport notable de concentrés, une teneur en grain optimale dans l'ensilage de maïs, minimisant les interactions digestives, pourrait se situer autour de 46%, valeur à moduler en fonction de la quantité et de la nature des différents amidons de la ration. Si l'objectif est, dans une optique d'économie et de désintensification partielle, de distribuer peu ou très peu de concentrés et de valoriser la nature double " fourrage et concentrés " de l'ensilage de maïs, la teneur en grain de l'idéotype ne devrait pas se situer en dessous de 46% de grain, voire peut-être se situer autour de 50% pour des rations couvrant pratiquement tous les besoins des animaux avec le maïs. Là encore, il faudra une dégradabilité de l'amidon optimisant les processus digestifs. Cette teneur en grain ou en amidon de l'idéotype de maïs ensilage doit évidemment être envisagée de façon spécifique au stade de récolte " ensilage ", et non pas au stade de récolte " grain ". La dégradabilité ruminale de l'azote sera un facteur à prendre en compte, alors que la variabilité pour ce caractère est actuellement inconnue. L'idéotype de maïs ensilage sera une plante de forte digestibilité de la plante entière, ayant au moins la valeur énergétique d'un hybride comme Eperon, et la digestibilité des parois d'une variété comme Inra258 ou Moreno. Il devra permettre aussi de fortes quantités ingérées, en ayant au moins l'ingestibilité d'une variété comme Dk265. Ces aspects de **très bonne valeur alimentaire du maïs ensilage** seront d'autant plus importants que cet idéotype **se situera dans une conduite de l'alimentation des animaux restrictive sur la distribution de concentrés et utilisant plus le pâturage, avec en conséquence une gestion des réserves corporelles** des animaux à mettre en place. **L'élevage de demain reposera sur la complémentarité entre le pâturage et l'affouragement avec un maïs ensilage d'excellentes valeur alimentaire, concentration énergétique et conservabilité, produit en conditions raisonnées d'intrants.**

■ Vers le maïs ensilage de demain, avec une qualification de sa valeur alimentaire

En terme d'inscription ou de recommandation, outre les qualités agronomiques d'un hybride récolté en plante entière, et au vu des résultats présentés dans ce texte, il est possible de soumettre des propositions à réflexion. Ainsi, des maïs ensilage précoces dont la valeur énergétique serait inférieure ou égale à 0,88 UFL ne devraient pas pouvoir être recommandés, et des maïs supérieurs à 0,92 UFL devraient être spécialement mentionnés. Ces seuils seraient définis par rapport à des témoins, et pourraient évoluer avec les progrès de la sélection. **Un critère qualifiant la meilleure ingestibilité de l'ensilage devrait être donné** dès qu'il sera disponible, sachant qu'une très bonne digestibilité évite de prendre des risques en terme d'ingestibilité. Si bien des travaux de recherche restent à faire pour que ce maïs idéal soit dispo-

nible chez l'éleveur, celui-ci a toutefois dès maintenant la possibilité de choisir un hybride dont la génétique plus spécialisée en "maïs ensilage" lui garantit des résultats zootechniques et économiques supérieurs. Et cela d'autant plus que **de nouvelles variétés de maïs ensilage précoce très récemment inscrites ou à l'inscription semblent apporter un progrès net** en rassemblant à la fois une bonne productivité, une résistance à la verse et une digestibilité correctes, se rapprochant ainsi de l'idéotype.

Accepté pour publication, le 25 février 1997.

Remerciements

Les travaux réalisés à l'I.N.R.A. de Lusignan ont bénéficié du soutien de PROMAIS (groupes de travail CPSV et DINAG), de celui du Ministère de l'Agriculture (Contrats de Branches) et du Ministère de la recherche (groupe de travail CPSV). Ils ont aussi bénéficié du soutien du Conseil Régional Poitou-Charentes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRIEU J., DEMARQUILLY C. (1988) : *Valeur nutritive des fourrages, tables et prévisions*, Jarrige R., *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, Ouvrage collectif dirigé par I.N.R.A. Ed., 471 p.
- ARGILLIER O. (1995) : *Relations entre verses, valeur alimentaire et productivité chez le maïs fourrage*, thèse de doctorat de l'INAPG, 173 p.
- ARGILLIER O., BARRIÈRE Y., HÉBERT 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* (AGPM, IE, INRA, ITCF), Nantes, 17-18 septembre, 447-448.
- ARGILLIER O., BARRIÈRE Y., TRAINÉAU R., EMILE J.C., HÉBERT Y. (1997) : "Genotype x environment interactions for digestibility traits in silage maize estimated from in vivo measurements with standards sheep", *Plant Breeding*, à paraître.
- BARRIÈRE 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, 201-221.
- BARRIÈRE Y., TRAINÉAU R., EMILE J.C. (1992) : "Variation and covariation of silage maize digestibility estimated from digestion trials with sheep", *Euphytica*, 59, 61-72.
- BARRIÈRE Y., EMILE J.C., TRAINÉAU R., HÉBERT Y. (1995a) : "Genetic variation in the feeding efficiency of maize genotypes evaluated from experiments with dairy cows", *Plant Breeding*, 114, 144-148.
- BARRIÈRE Y., EMILE J.C., HÉBERT Y. (1995b) : "Genetic variation in the feeding efficiency of maize genotypes evaluated from experiments with fattening bulls", *Agronomie*, 15, 539-546.

- BERNARD-VAILHÉ M.A. (1995) : *Influence de la qualité des lignines et acides phénols sur la dégradation des parois végétales dans le rumen - Etude de plantes transgéniques et normales*, thèse Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 226 p.
- CARPENTIER B., HAUREZ P., BRAUSCHWIG PH., HAUREZ PH., JOULIE M. (1995) : "Valorisation par les jeunes bovins et les vaches laitières d'ensilages de maïs choisis pour leur digestibilité différente", *Rencontre Recherche Ruminants*, Institut de l'Elevage Ed, 2, 113-118.
- Ciba-semences (1990) : *Valorisation laitière d'une variété de maïs en ensilage, synthèse de l'expérimentation menée par l'EDE de Vendée en 1988-1989-1990*, 13p.
- COORS J.G., CARTER P.R., HUNTER R.B. (1994) : "Silage corn", *Specialty Corns*, A. R. Hallauer editor, CRC Press, London, 305-340.
- DOLSTRA O., MEDEMA J.H. (1990) : "An effective screening method for genetic improvement of cell-wall digestibility in forage maize", *Proc. 15th Cong. maize and sorghum section of Eucarpia*, Baden, Austria, June 4-8, 258-270.
- EMILE J.C., BARRIÈRE Y. (1992) : "Effets de la teneur en grain de l'ensilage de maïs sur les performances zootechniques des vaches laitières", *INRA Prod. Anim.*, 5, 113-120.
- EMILE J.C., GILLET M., GHESQUIÈRE M., CHARRIER X. (1992) : "Pâturage continu de fétuques élevées par des vaches laitières : amélioration de la production par utilisation de variétés sélectionnées pour l'appétibilité", *Fourrages*, 130, 159-169.
- EMILE J.C., BARRIÈRE Y., MAURIÈS M. (1996) : "Effects of maize and alfalfa genotypes on dairy cow performances", *Ann. Zoot.*, 45, 17-27.
- HÉBERT Y., BARRIÈRE Y., BERTHOLLEAU J.C. (1992) : "Root lodging resistance in forage maize: genetic variability of root system and aerial part", *Maydica*, 37, 173-183.
- HÉBERT Y., ARGILLIER O., BARRIÈRE Y. (1996) : "Tolérance à la verse en végétation et caractéristiques de valeur alimentaire chez le maïs fourrage", *Colloque maïs ensilage* (AGPM, IE, INRA, ITCF), Nantes, 17-18 septembre, 355-362.
- HODEN A., BARRIÈRE Y., GALLAIS A., HUGUET L., JOURNET M., MOURGUET A. (1985) : "Le maïs brown-midrib plante entière. III Utilisation sous forme d'ensilage par des vaches laitières", *Bull. Tech. CRZV Theix*, INRA, 60, 43-58.
- ISTASSE L., GIELEN M., DUFRASNE L., CLINQUART A., VAN EENAEME C., BIENFAIT JM. (1990) : "Ensilage de maïs plante entière, comparaison de 4 variétés. 2. Performances zootechniques", *Landbouwtijdschrift - Revue de l'Agriculture*, 43, 996-1005.
- LE GALL A., LEGARTO J., PFLIMLIN A. (1996) : "Systèmes fourragers laitiers et environnement, incidence de l'équilibre herbe maïs", *Colloque maïs ensilage* (AGPM, IE, INRA, ITCF), Nantes, 17-18 septembre, 231-261.
- LEMAIRE G., CHARRIER X., HÉBERT Y. (1996) : "Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions", *Agronomie*, 16, 231-246.
- LUNDVALL J.P., BUXTON D.R., HALLAUER A.R., GEORGE J.R. (1994) : "Forage quality variation among maize inbreds: in vitro digestibility and cell wall components", *Crop Sci.*, 34, 1672-1678.

- MELCHINGER A.E., GEIGER H.H., SCHMIDT G.A. (1986) : "Vertical root pull resistance and its relationship to root lodging and forage traits in early maturing european inbred lines and F1 hybrids of maize", *Maydica*, 31, 335-348.
- MINSON D.J., WILSON J.R. (1994) : "Prediction of intake as an element of forage quality", *Forage quality, evaluation and utilisation*, Fahey GC Editor, American Society of Agronomy Inc., Crop Science Society of America Inc., Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, 533-563.
- OPATPANAKIT Y., KELLAWAY R.C., LEAN I.J., ANNISON G., KIRBY A. (1995) : "Effects of cereal grains on fibre digestion in vitro", *Aust. J. Agric. Res.*, 46, 403-413.
- SAUVANT D., CHAPOUTOT P., ARCHIMÈDE H. (1994) : "La digestion des amidons et ses conséquences", *Prod. Anim.*, 7, 115-124.
- PHILLIPEAU C., MICHALET-DOREAU B. (1997) : "Influence of genotype and starch maturity of maize on ruminal starch degradation", *Anim. Feed Sci. Technol.*, à paraître.
- TOLLENAAR M., MCCULLOUGH D.E., DWYER L.M. (1994) : "Physiological basis of the genetic improvement of corn", *Genetic improvement of field crops*, GA Sflafer Ed., M Dekker Inc., 83-236.
- TOVAR GOMEZ M., EMILE J.C., MICHALET-DOREAU B., BARRIÈRE Y. (1997) : "In situ degradation kinetics of maize hybrids stalks", *Anim. Feed Sci. Technol.*, à paraître.
- VAN KEULEN H., VAN DER MEER H., DE BOER I.J.M. (1996) : "Nutrient balances of livestock production systems in the Netherlands", WIAS Symposium, *Utilization of local feed resources by dairy cattle*, Wageningen, EAAP Publication n° 84, 3-18.

A partir de prédictions de la solubilité enzymatique des plantes entières (IVDMS), de leur teneur en amidon (Amidon%) et de leur teneur en glucides solubles (Glucides solubles%), DINAG est une estimation de la digestibilité de la partie "non-amidon non-glucides solubles", calculée ainsi :

$$\text{DINAG} = \frac{100 \times (\text{IVDMS} \% - \text{Amidon}\% - \text{Glucides solubles}\%)}{(100 - \text{Amidon}\% - \text{Glucides solubles}\%)}$$

Ce critère permet aussi d'estimer une valeur énergétique UFL (corrélation entre valeurs observées et prédites : $r = 0,80$, $rse = 0,02$) :

$$\text{UFL} = 0,5080 - 0,0071 \times \text{NDF} + 0,0108 \times \text{DINAG}$$

ANNEXE 1 : Présentation du critère DINAG, digestibilité de la partie "non-amidon non-glucides solubles" (d'après ARGILLIER *et al.*, 1995, 1996).

APPENDIX 1 : The DINAG character, measuring the digestibility of the "non-starch, non-soluble carbohydrate" part (after ARGILLIER et al., 1995, 1996).

SUMMARY

Forage maize ideotype and cattle feeding

Hybrid maize for silage must now be considered different from maize for grain, and clearly the best grain hybrid is not necessarily the best for silage. A silage ideotype would be a hybrid with a good, stable biomass. The grain content should be about 46%, for the usual amount of concentrate in the diet, but not below this value, possibly above it, nearing 50% in the diet of animals fed more extensively, with only small amounts of concentrate. Earliness of ripening should be adapted to the local conditions, with a good tolerance to low temperatures. A good resistance to lodging is necessary, and also a well-developed root system, which is probably in relation with a better tolerance to water shortage. The feeding value should be assessed taking into account the enzymatic solubility, predicted from a NIRS calibration, and cell wall digestibility, such as that determined by DINAG. Voluntary intake should be considered, when a way of predicting it will be available. The characteristics of feeding value chosen must be relevant to animal performances. To avoid the risk of genetic drift towards low feeding values when breeding for improved resistance to stalk lodging, both characters have to be considered simultaneously. Maize should be grown "ecologically", with a good balance between the requirements of the crop and the nitrogen returned by animal effluents. Locally, the value of the silage depends on the choice of the hybrid. Recommended lists of silage cultivars should therefore contain only hybrids with feeding values not below than 0.90 FU (feed units for lactation), excluding those with values below or equal to 0.88 FU. With elite silage maize hybrids, values of 0.95 FU could be considered, having possibly also larger voluntary intakes. The energy complementation in the diet would then be considered and, depending on the high feeding value of this new roughage, a better economic result could be achieved on the farm. For a stock breeder, the choice of a maize cultivar specially adapted to silage must come first, and he has to bear in mind that the forage it will produce has to be cheap, reliable, and endowed with a high and stable feeding value.