

Fertilisation azotée du maïs ensilage

sur la bordure est du Massif central.

II - Conduite de la fertilisation organique et minérale

B. Fabre¹, R. Molin², C. Gueydon³, J.M. Vinatier⁴

Sur la bordure est du Massif central, région de forte diversité, les doses de fumier apportées avant maïs ensilage sont importantes. Quelle est la valorisation de ce fumier et de la fertilisation minérale de printemps ? Un réseau de parcelles expérimentales permet de comparer différentes conduites de fertilisation dans différents types de situation et d'envisager une réduction des apports.

RESUME

Pendant 4 ans, sur environ 20 parcelles, ont été testées différentes modalités : la conduite de l'agriculteur (AGRI : 40 à 50 t de fumier/ha), une dose réduite (DR : 20 tonnes/ha), et un témoin sans azote organique (T0), chacun avec ou sans supplément d'azote minéral (DRN et TON). La dose réduite de fumier, avec apport d'un complément minéral (50 kg N/ha d'azote) assure la même production que la pratique de l'agriculteur. L'efficacité de l'azote organique et de l'azote minéral est inférieure aux normes (effet direct), variable selon les zones. Les reliquats après récolte restent élevés, du fait de la forte capacité de fourniture en azote du sol. Des doses de fumier plus faibles que celles qui sont testées sont à envisager, avec un apport d'azote minéral et des cultures intercalaires ou intermédiaires qui consommeront les excédents d'azote.

MOTS CLES

Azote, bilan d'azote, développement agricole, diagnostic, efficacité des engrais, fertilisation organique, fertilisation minérale, fertilisation raisonnée, maïs, nutrition azotée, production fourragère, Rhône-Alpes, variations annuelles.

KEY-WORDS

Agricultural development, annual variations, diagnosis, fertilizer efficiency, forage production, maize, nitrogen, nitrogen balance, nitrogen nutrition, mineral fertilization, organic fertilization, rational fertilization, Rhône-Alpes region.

AUTEURS

1 : I.S.A.R.A, 31, place Bellecour, F-69288 Lyon cedex 02 ; bernard.fabre@isara.fr

2 : Chambre d'Agriculture du Rhône.

3 : Chambre d'Agriculture de la Loire.

4 : Chambre Régionale d'Agriculture de Rhône-Alpes.

Dans un précédent article (Fabre *et al.*, 2002, même ouvrage), nous avons montré comment un réseau de parcelles d'essais nous a permis de regrouper les parcelles d'agriculteurs et d'affecter à chaque groupe des objectifs de production et des estimations des fournitures d'azote du sol. Ces données spécifiques à chaque groupe sont les bases du calcul de la fertilisation azotée.

Ce réseau de parcelles, testant différentes stratégies de fertilisation organique et minérale, doit montrer la possibilité de réduire les apports de fumier sur maïs. Dans ce deuxième article, nous reprenons et affinons les résultats du réseau sur la conduite de la fertilisation azotée : effets des apports de fumier et d'azote minéral et efficacité de ces différentes formes d'azote. Mais avant de présenter le protocole d'expérimentation, rappelons quelques caractéristiques de la région et des groupes de parcelles.

Rappels : zone d'étude, variabilité climatique et protocole

* Le milieu naturel

Située en zone de coteaux et de demi-montagne, cette région est très différenciée tant par ses caractéristiques pédologiques que climatiques. Trois régions naturelles la composent. Au nord, la région des Monts du Beaujolais, assez arrosée, d'altitude variant de 550 à 1 000 mètres, aux pentes assez marquées et fortement boisées (sapins et douglas). Au sud, et répartie sur les deux départements de la Loire et du Rhône, est située la région des Monts du Lyonnais, au relief assez accidenté entre 400 et 950 m d'altitude. La pluviométrie régulière, la proximité des centres urbains, en ont fait une région agricole assez intensive et peu boisée. Au centre-ouest, c'est la zone du Plateau de Neulise, qui fait seuil entre les plaines du Forez et du Roannais et qui est entaillée sur près de 30 km par le passage de la Loire. Les trois régions agricoles de la zone d'étude ont des caractéristiques pédoclimatiques différentes. Cela induit des modes d'utilisation du milieu variés.

* Les caractéristiques des groupes de parcelles du réseau

Cinq groupes ont été constitués, dont nous résumons les caractéristiques :

- Groupe A : parcelles du Mont du Beaujolais, d'altitude assez élevée et fortement arrosées (en moyenne 370 mm pendant le cycle du maïs) donc à faibles contraintes hydriques, mais avec des contraintes thermiques au printemps ;
- Groupe B : parcelles irriguées du plateau de Neulise ou à forte pluviométrie (338 mm pendant le cycle du maïs) et à forte profondeur de sol des Monts du Lyonnais ; ici également peu de contraintes hydriques ;
- Groupe C : parcelles dont la profondeur de sol et la dégradation du profil sont fortes, ce qui induit une contrainte hydrique par manque d'exploration racinaire ;
- Groupe D : parcelles du plateau de Neulise (286 mm) non irriguées (sols superficiels et séchants) ;
- Groupe E : parcelles d'altitude élevée des Monts du Lyonnais, aux sols superficiels et/ou à fort flux de matière organique, avec des contraintes hydriques et thermiques.

* Le protocole d'expérimentation

L'objectif est de montrer l'intérêt d'une réduction de l'ordre de 50% de la quantité de fumier épandu et d'un faible apport d'azote minéral en cours de végétation du maïs pour compenser les différences de minéralisation car les printemps sont souvent frais. Les traitements (Fabre *et al.*, 2002, même ouvrage) sont définis ci-dessous :

- Trois traitements sur toutes les parcelles :
 - T0 : Témoin zéro azote : aucun apport, ni minéral, ni organique,
 - DR : Dose réduite de fumier (25-30 t/ha selon les situations),
 - AGRI : Pratique de l'agriculteur : fumier en quantité souvent importante (entre 50 et 100 t/ha) presque toujours complété par un apport d'azote minéral (de 18 à 20 kg N/ha) principalement sous forme de phosphate d'ammoniaque.
- Deux traitements annexes sur certaines parcelles
 - T0N : Témoin zéro + azote minéral : uniquement 50 kg/ha d'azote minéral, apportés au stade 5-7 feuilles,
 - DRN : Dose réduite de fumier + azote minéral (50 kg N/ha) au stade 5-7 feuilles.

Résultats

1. Variabilité du climat

La variabilité (interannuelle et intra-annuelle) des productions est très forte, en lien avec la variabilité climatique et la diversité pédoclimatique et culturale des parcelles, et a été décrite dans le premier texte (Fabre *et al.*, 2002, même ouvrage). Le climat a été caractérisé par l'analyse des températures, la pluviométrie, l'ETP et le déficit hydrique sur la période de végétation du maïs (1^{er} mai - 30 septembre) et la période estivale (20 juin - 20 août ; tableau 1 : moyenne de tous les postes).

Tableau 1 : Moyenne des données climatiques des stations utilisées (bordure est du Massif central).

Table 1 : Averages of climatic data for the sites concerned (eastern slopes of Massif central).

	1995	1996	1997	1998	Moyenne
Pluviométrie* (P, mm)	370	355	378	393	369
Somme de températures* (°)	1581	1448	1748	1661	1610
ETP** (mm)	288	249	257	283	269
ETP - P** (mm)	187	56	94	163	125

* : du 1/05 au 30/09, ** : du 20/06 au 20/08

Les années d'expérimentation ont été décrites du 1^{er} mai au 30 septembre, par rapport à la normale, et replacées dans une étude fréquentielle (Robert, 1999) :

– 1995 est une année très sèche en été et fraîche au printemps. En effet, les précipitations sont faibles et mal réparties et l'évapotranspiration est forte et continue tout l'été. Le déficit hydrique est très important. De plus, les sommes de températures sont inférieures à la normale.

– 1996 est une année humide et froide : les précipitations sont très fortes l'été, tandis que la somme des températures est la plus faible des 4 ans, de même que l'évapotranspiration et le rayonnement pratiquement tout l'été. Ceci entraîne un déficit hydrique très peu important pour cette période.

– 1997 est une année chaude et pluvieuse en été : la somme des températures est la plus forte des 4 années d'expérimentation, tandis que les précipitations restent assez élevées et régulières en été. L'évapotranspiration est plus forte au printemps et à la fin de l'été, et légèrement plus faible en juillet. Le déficit hydrique est très faible l'été.

– 1998 est une année pluvieuse, mais déficitaire en eau l'été. En effet, la pluviométrie du 1^{er} mai au 30 septembre est la plus forte des 4 années d'expérimentation, mais le déficit hydrique du 20 juin au 20 août est important, dû notamment à une forte évapotranspiration durant l'été. Cette année bénéficie d'une somme des températures élevée.

Les différences entre les huit stations météorologiques utilisées sont elles aussi importantes. La moyenne (sur les quatre années) des sommes de températures varie de 1 551°jour à Monsols (Monts du Beaujolais) à 1 726°jour à Roanne (Plateau de Neulise), et la pluviométrie, pendant le cycle du maïs, de 307 mm à Roanne à 400 mm à Monsols.

2. Effets des traitements

Les résultats sont traités selon les groupes précédemment définis. La comparaison des traitements a été réalisée par analyse de variance et test d'égalité des espérances (chaque parcelle est considérée comme une répétition). Dans un premier temps, nous comparons les traitements AGRI, DR et T0, puis nous affinons les résultats en analysant l'effet d'un apport d'azote minéral. Les différentes données de comparaison des traitements proviennent des parcelles qui n'ont pas eu de traitement témoin T0 l'année précédente, afin de rester proche d'une pratique agricole.

* Effet de la dose d'apport de fumier

On constate, entre les différents groupes, une forte variabilité des productions quel que soit le traitement. L'effet des traitements est significatif toutes parcelles confondues, tant sur les productions obtenues que sur les teneurs en azote et les indices de nutrition (tableau 2). Cependant, on note que pour les groupes A, B et E, les productions T0 et DR ne sont pas statistiquement différentes. Pour les groupes D et E, l'effet des traitements est faible, et non significatif entre AGRI et DR. En général, la teneur en azote du maïs à la récolte est plus faible pour T0 et plus forte pour AGRI mais, là encore, non statistiquement différente pour les groupes D et E. Ceci conduit à des indices de nutrition azotée en général plus forts sur les traitements AGRI et plus faibles sur T0, montrant une insuffisance de nutrition azotée des maïs conduit en T0.

Tableau 2 : Effet des doses de fumier sur la production de maïs et sa nutrition azotée, ainsi que sur les reliquats et les exportations (traitements AGRI, DR, T0 ; n = 78).

Table 2 : Effect of f.y.m. rates on maize production and its N nutrition, and on residues and removals in treatments AGRI, DR and T0 (n = 78).

Groupe	n	Production (t MS/ha)			Teneur en N (g/kg)			INN			Reliquat N Récolte (kg N/ha)			Exportations N (kg N/ha)		
		AGRI	DR	T0	AGRI	DR	T0	AGRI	DR	T0	AGRI	DR	T0	AGRI	DR	T0
A	16	12,8	11,4	11,5	11,3	11,3	10,6	0,85	0,82	0,77	56	50	49	145	130	123
B	27	15,7	14,9	13,7	11,8	11,0	10,4	0,95	0,87	0,80	89	65	59	184	163	143
C	18	13,9	12,2	11,5	12,1	11,0	11,0	0,93	0,81	0,79	75	61	52	167	134	126
D	10	10,4	10,3	9,3	12,7	12,3	11,4	0,88	0,85	0,76	71	42	39	132	126	107
E	7	11,7	11,5	11,8	13,6	12,1	12,3	1,00	0,87	0,90	89	55	62	161	140	148
Moyenne		13,7	12,7	12,0	12,0	11,3	10,9	0,92	0,84	0,80	76	57	53	163	143	131

Ces différences entre productions et entre teneurs en azote du maïs induisent des exportations en azote beaucoup plus élevées sous les traitements AGRI (tableau 2). Malgré cette augmentation des exportations, les reliquats en azote après la récolte sont beaucoup plus élevés sous ces mêmes traitements. Le traitement DR induit des reliquats proches de T0, en moyenne respectivement de 57 et 53 kg N/ha. Néanmoins, sur T0, les reliquats restent élevés, malgré l'absence de fertilisation.

En conclusion, le traitement AGRI permet une bonne nutrition (INN moyen de 0,92) et des productions plus élevées, mais il entraîne une forte pollution du milieu par des reliquats élevés (reliquat moyen supérieur à 75 kg N/ha). Selon les cas, le traitement DR est proche d'AGRI ou de T0, traduisant une forte variabilité des fournitures du sol selon les parcelles. Peut-on améliorer ces résultats ? Les traitements avec apport d'azote minéral permettent d'affiner l'analyse.

* Effet d'un apport d'azote minéral avec une dose réduite de fumier

Pour l'ensemble des groupes, on peut conclure à une égalité des productions entre AGRI et DRN (tableau 3). L'apport de 25 à 30 t de fumier et 50 kg N/ha d'azote minéral est donc amplement suffisant et couvre les besoins du maïs.

En outre, les teneurs en azote de la récolte et les niveaux de nutrition azotée ne diffèrent pas statistiquement, ce qui conduit à des exportations comparables, sauf pour le groupe C pour lequel les exportations du traitement DRN sont significativement inférieures (tableau 3). Les INN ne sont statistiquement différents que pour le groupe C. La forte tendance à la dégradation du profil cultural qui caractérise ce groupe entraîne une mauvaise utilisation de l'azote par le peuplement.

Pour le traitement DRN, malgré la réduction de fertilisation organique, on constate que les reliquats de fin de culture restent très élevés, de l'ordre de 60 à 80 kg N/ha et identiques à ceux du traitement AGRI. Cependant, pour les groupes D et E, le reliquat du traitement AGRI est supérieur de 20 à 30 kg N/ha à celui du traitement DRN. Ce dernier groupe, de faible effectif, a une très forte variabilité. Les groupes B et C ont les plus forts reliquats quels que soient les traitements. On peut donc conclure que le traitement DRN, malgré la baisse de la fertilisation organique, présente également un risque de fuites de nitrate élevé.

Tableau 3 : Comparaison des traitements AGRI et DRN : effets sur la production de maïs et sa nutrition azotée, ainsi que sur les reliquats et les exportations (n = 75).

Table 3 : Comparison of treatments AGRI and DRN : effects on maize production and its N nutrition, and on residues and removals (n = 75).

Groupe	n	Production (t MS/ha)		Teneur en N (g/kg)		INN		Reliquat N Récolte (kg N/ha)		Exportations N (kg N/ha)	
		AGRI	DRN	AGRI	DRN	AGRI	DRN	AGRI	DRN	AGRI	DRN
A	13	12,2	12,4	11,4	11,7	0,84	0,87	55	69	139	147
B	27	15,7	15,3	11,8	11,6	0,95	0,93	88	78	184	176
C	18	13,9	13,3	12,1	11,5	0,94	0,87	75	81	167	151
D	10	10,4	10,4	12,7	12,5	0,88	0,87	71	59	132	131
E	7	11,7	11,4	13,6	13,5	1,00	0,97	89	58	161	154
Moyenne		13,6	13,3	12,1	11,9	0,92	0,90	77	73	163	157

* Effet d'un apport d'azote minéral

L'apport de 50 kg N/ha au stade 5-7 feuilles (traitement DRN) en plus de la dose réduite de fumier (traitement DR), permet globalement une augmentation des productions, mais celle-ci n'est significative que pour les groupes A et C (tableau 4). Pour le groupe A, la minéralisation due aux retournements de prairies de longue durée est bloquée ou ralentie par le froid (zone plus en altitude). Pour le groupe C, la minéralisation et l'alimentation azotée sont ralenties par les conditions de sol (profil en général fortement dégradé). Cet apport d'azote minéral augmente toujours la teneur en azote de la récolte et l'INN, hormis pour le groupe D.

Tableau 4 : Comparaison des traitements DRN et DR : effets sur la production de maïs et sa nutrition azotée, ainsi que sur les reliquats et les exportations (n = 75).

Table 4 : Comparison of treatments DRN and DR : effects on maize production and its N nutrition, and on residues and removals (n = 75).

Groupe	n	Production (t MS/ha)		Teneur en N (g/kg)		INN		Reliquat N Récolte (kg N/ha)			Exportations N (kg N/ha)			Total (kg N/ha)
		DRN	DR	DRN	DR	DRN	DR	DRN	DR	Ecart	DRN	DR	Ecart	
A	13	12,4	10,9	11,7	11,3	0,87	0,80	69	49	20	147	122	25	45
B	27	15,3	14,9	11,6	11,0	0,93	0,87	78	65	14	176	163	13	27
C	18	13,3	12,2	11,5	11,0	0,87	0,81	81	62	19	151	134	17	36
D	10	10,4	10,3	12,5	12,3	0,87	0,85	59	43	16	131	126	5	21
E	7	11,4	11,5	13,5	12,1	0,97	0,87	58	55	3	154	140	15	18
Moyenne		13,3	12,6	11,9	11,3	0,90	0,84	73	58	15	157	142	15	30

Les différences de production et de teneur conduisent à une augmentation des exportations d'azote, de 5 à 25 kg N/ha. On constate (tableau 4) une augmentation des reliquats en fin de culture de l'ordre de 3 à 20 kg N/ha. Ainsi, 10 à 50% de l'apport d'azote minéral est valorisé par le maïs, et 6 à 40% de cet apport (en masse) se retrouve sous forme de reliquat de fin de culture.

On retrouve donc 40 à 90% des suppléments d'engrais apportés. Le reste de l'engrais peut avoir été lessivé, en particulier dans les sols superficiels, ou organisé par la biomasse microbienne, avec un risque de minéralisation après la récolte.

Du fait des faibles différences de production (de l'ordre de 0,5 à 1 t MS/ha) entre DR et DRN, on pourrait remettre en cause l'apport minéral. Mais cela nuirait à la qualité du fourrage (baisse de 0,6 g/kg de la teneur en

azote). Un apport d'azote minéral peut donc rester intéressant. Néanmoins, les reliquats "post-récolte" restent élevés. On peut penser qu'ils sont principalement dus à une forte minéralisation de l'azote en fin d'été, alors que les prélèvements par la plante sont faibles à cette époque. Des solutions pour limiter ces reliquats restent à tester localement.

Les productions sans apport organique sont, en moyenne, plus élevées avec apport d'azote minéral. Cependant, pour les groupes de parcelles C, D, E, l'augmentation n'est pas significative (tableau 5). L'apport de fertilisant minéral conduit à une augmentation des INN et de la teneur en azote sauf pour les groupes C et E.

Dans tous les groupes, les reliquats "post-récolte" restent élevés et du même ordre de grandeur que pour les autres traitements, même s'ils sont systématiquement supérieurs pour les traitements azotés (tableau 5) : environ 70 kg N/ha (par rapport à 50 kg N/ha pour les traitements sans azote). On retrouve donc le même type de résultat que pour les traitements DR et DRN.

Malgré les augmentations de production et de teneur en azote des récoltes, les excédents d'exportations ne représentent que 25 à 50% des apports minéraux sauf pour E. L'équivalent de 10 à 60% des quantités apportées se retrouve dans le reliquat post-récolte (tableau 5). Mis à part le groupe E, la somme des excédents de reliquats et des exportations approchent le niveau des apports minéraux, sauf pour A du fait de la faible augmentation des reliquats. Ce résultat déjà indiqué par la comparaison des traitements DR/DRN montre que la forte capacité de minéralisation de ces sols (ayant un passé de fumure organique élevée et/ou de retournements de prairies de plus ou moins longue durée) est difficilement maîtrisable avec ces systèmes de culture. Cependant, elle n'empêche pas la valorisation d'un petit apport d'azote minéral en cours de végétation par une augmentation de production.

Tableau 5 : Comparaison des traitements T0 et T0N : effets sur la production de maïs et sa nutrition azotée, ainsi que sur les reliquats et les exportations (n = 36).

Table 5 : Comparison of treatments T0 and T0N : effects on maize production and its N nutrition, and on residues and removals (n = 36).

Grou Pe	n	Production (t MS/ha)		Teneur en N (g/kg)		INN		Reliquat N Récolte (kg N/ha)			Exportations N (kg N/ha)			Total (kg N/ha)
		T0N	T0	T0N	T0	T0N	T0	T0N	T0	Ecart	T0N	T0	Ecart	
A	10	12,7	11,8	11,8	11,3	0,89	0,82	62	54	7	150	132	18	25
B	13	15,2	14,0	11,2	10,5	0,90	0,82	78	58	20	170	147	23	43
C	7	12,3	11,8	12,7	12,1	0,93	0,88	96	62	34	151	139	12	46
D	3	9,9	9,3	12,6	11,0	0,86	0,74	60	38	23	125	104	21	43
E*	3	12,9	13,4	13,9	14,0	1,03	1,07	73	67	6	174	187	-13	-7
Moyenne		13,3	12,5	12,0	11,4	0,91	0,84	75	57	18	157	141	16	34

* Le groupe E n'est composé que de 3 parcelles dont l'une a reçu avant l'expérimentation de fortes doses de fientes de volailles. Les autres ont des précédents prairies de moyenne durée avec de fortes capacités minéralisatrices.

L'ensemble de ces résultats nous conduit à affirmer que le traitement DRN est donc amplement suffisant pour la nutrition azotée du maïs. Compte tenu de l'ampleur des reliquats en entrée d'hiver, la mise en place de culture intermédiaire ou intercalaire dans le maïs dès le mois de juin devrait être étudiée. Les systèmes de culture qui conduisent à une dégradation du profil cultural pénalisent fortement l'alimentation de la plante et contribuent à l'augmentation des reliquats d'automne.

3. Efficacité de l'azote minéral et des fumiers

* Méthode de calcul de l'efficacité de l'azote apporté

L'efficacité d'un apport d'élément minéral peut se juger de plusieurs manières : soit en rapport à la production de matière sèche, il s'agit alors d'efficacité (Eff.) ; soit en rapport aux prélèvements en azote, avec un coefficient apparent d'utilisation (CAU). L'utilisation des couples T0/T0N et des couples DR/DRN

permet d'approcher l'efficacité de l'azote minéral (Eff.Nmin) ; les couples T0/DR et T0N/DRN permettent d'approcher celle de l'azote organique (Eff.Norg) :

$$\text{Eff.Nmin} = (\text{Production}_{\text{Traitement avec Nmin}} - \text{Production}_{\text{Traitement 0N}}) / \text{Nmin}$$

$$\text{Eff.Norg} = (\text{Production}_{\text{Traitement avec Norg}} - \text{Production}_{\text{Traitement 0Norg}}) / \text{Norg}$$

$$\text{CAU Nmin} = (\text{Prélèvement N}_{\text{Traitement avec Nmin}} - \text{Prélèvement N}_{\text{Traitement 0N}}) / \text{Nmin}$$

$$\text{CAU Norg} = (\text{Prélèvement N}_{\text{Traitement avec Norg}} - \text{Prélèvement N}_{\text{Traitement 0Norg}}) / \text{Norg}$$

* Efficacité de l'azote minéral

Les apports d'azote minéral sont voisins de 50 kg N/ha. L'efficacité et le CAU sont très faibles et variables selon les traitements et les groupes. Les valeurs moyennes par groupe retenues pour l'efficacité de l'azote minéral, le CAU et l'indice de nutrition azotée sont présentées tableau 6. En moyenne, l'azote apporté produit 13 kg MS par kg d'azote, ce qui est loin des 80 kg MS par kg d'azote escomptés, estimation utilisée dans le calcul des besoins en azote pour la prévision de la fertilisation azotée (de 11,2 kg N/t MS à 15,7 kg N/t MS, soit de 89 à 64 kg MS/kg N, variation liée au niveau de production et aux conditions de prélèvement ; Desvignes et Bodet, 2000).

Tableau 6 : Valeurs moyennes retenues pour l'efficacité de l'azote minéral, le CAU et l'indice de nutrition azotée selon le groupe de parcelles en bordure est du Massif central.

Table 6 : Mean values retained for the estimation of the efficiency of mineral N, of the apparent co-efficient of utilization (CAU) and of the index of nitrogenous nutrition, according to the group of plots on the eastern slope of Massif central.

Groupe	A	B	C	D	E
Efficiency Nmin (kg MS/kg Nmin)	25	15	14	0	0
CAU Nmin (kg N prélevé/kg Nmin)	0,44	0,25	0,43	0,19	0,23
INN T0	0,82	0,82	0,88	0,74	1,07

Dans les zones très séchantes, comme les groupes D et E, l'efficacité de l'azote minéral est faible et très variable selon les parcelles, du fait de la très forte variabilité des productions et de la minéralisation. Pour les groupes A et C, l'efficacité est plus forte. En effet, le groupe A est en altitude, avec une aptitude à la minéralisation moyenne ; une fertilisation minérale au printemps sera assez bien valorisée. De même, dans le groupe C, la forte dégradation du profil et des teneurs en matière organique plus faibles permettent de comprendre cette efficacité plus élevée.

Les CAU reflètent cette constatation de la faible efficacité de l'azote minéral (moyenne pondérée de 0,19 à 0,44 selon le groupe, moyenne générale de 0,31), ainsi que la forte fourniture en azote du sol. Cette remarque est corroborée par les INN des traitements T0 qui sont voisins de 0,80, indiquant une nutrition azotée peu limitante. Ces valeurs sont très inférieures à celles utilisées pour les calculs de fertilisation azotée du maïs grain sans apport organique (de 0,6 à 0,8 selon les dates d'apport des fertilisants) et posent la question de la pertinence d'un apport d'azote minéral dans de telles conditions, malgré l'augmentation des teneurs (+0,6 g N/kg).

* Efficacité de l'azote des fumiers

L'efficacité de l'azote des fumiers est faible (moyenne de 5,6 kg MS/kg N, en intégrant les groupes A et E qui valorisent particulièrement mal les apports organiques ; tableau 7). Les CAU varient de valeurs négatives pour E à près de 0,14 kg N/ kg Norg pour B (moyenne de 0,09 kg N/kg Norg). Le groupe C présente un faible CAU à cause du faible effet du fumier sur la valeur azotée du maïs (tableau 7). Les INN sont en général augmentés (en moyenne +0,05 à +0,12) par les apports de fumier : l'azote du fumier est tout de même utilisé par le maïs.

L'efficacité des fumiers est très variable selon les années : de 0,36 kg MS/kg Norg en 1995 à 7,53 kg MS/kg Norg en 1997 pour l'efficacité et de 0,05 à 0,13 kg N prélevé/kg Norg apporté, respectivement en 1995

et 1997. 1995, année fraîche au printemps et sèche en automne, et 1998, année sèche en été, n'ont pas eu des conditions de minéralisation correctes. Seule l'année 1997, caractérisée par des températures et une pluviosité très favorables à la minéralisation et à l'utilisation de l'azote par la végétation, a permis de valoriser l'apport de fumier.

D'une manière générale, l'efficacité du fumier est réduite quand il y a apport d'azote minéral : on passe de 5,63 à 1,18 kg MS/kg Norg en moyenne pour l'efficacité et de 0,09 à 0,03 pour les CAU Norg (tableau 7). L'effet année est ici aussi très marqué. Ces efficacités très faibles des fumiers sont elles aussi le reflet des arrière-effets très importants des retournements de prairies et des apports de fumier des années précédentes.

Tableau 7 : Efficacité du fumier selon les groupes de parcelles à partir des résultats des traitements DR et T0 (n = 129) ou DRN et T0N (n = 38).

Table 7 : Efficiency of farmyard manure in the different plot groups as estimated from the results of treatments DR and T0 (n = 129) or DRN and T0N (n = 38).

Groupe	DR/T0			DRN/T0N		
	n	Effici+ence Norg (kg MS/kg Norg)	CAU Norg* (kg N prélevé/kg Norg)	n	Effici+ence Norg (kg MS/kg Norg)	CAU Norg* (kg N prélevé/kg Norg)
A	23	2,91	0,10	10	0,61	0,02
B	50	8,43	0,14	12	4,43	0,05
C	28	5,71	0,05	5	6,37	0,06
D	17	5,92	0,10	7	-14,32	-0,13
E	11	-2,08	-0,03	4	2,64	0,18
Moyenne		5,63	0,09		1,18	0,03

* CAU Norg = (N prélevé _{Traitement avec fumier} - N prélevé _{Traitement 0 Fumier}) / N fumier

* Comparaison des CAU de l'azote minéral et de l'azote organique

Bodet *et al.* (2001) définissent "le coefficient d'équivalence azote comme le rapport entre l'équivalent en azote engrais minéral de l'azote total d'un engrais de ferme sur la quantité totale d'azote apporté par cet engrais" (Norg). L'équivalent azote engrais minéral (Xéqui) est la quantité d'azote minéral (sous forme amoniacotritique) qu'il faudrait apporter pour avoir une production identique à celle produite après épandage d'engrais de ferme. Ce coefficient est en général obtenu à partir d'essais au champ portant sur des doses d'engrais minéral couplées avec un traitement "engrais de ferme". Le coefficient d'équivalence azote est donc égal à Xéqui/Norg.

Nous avons calculé ce coefficient d'équivalence azote en faisant le rapport des CAU (CAU Norg/CAU Nmin) :

$$Y = N0 + Norg \cdot CAU Norg, \text{ et } Y = N0 + Xéqui \cdot CAU Nmin, \text{ donc } Xéqui/Norg = CAU Norg/CAU Nmin$$

D'où le coefficient d'équivalence azote : CAU Norg/CAU Nmin

Les CAU de l'azote organique (de 0 à 0,14 selon les groupes) sont très inférieurs à ceux de l'azote minéral (de 0,19 à 0,44 selon les groupes). Leur rapport, qui donne l'équivalence engrais, varie de 10 à 56%. Les coefficients d'équivalence donnés par Ziegler et Heduit (1991), Bodet *et al.* (2001) sont de 80% pour des apports annuels sur maïs au printemps, de 55% pour des apports bisannuels et de 30% pour des apports occasionnels.

Dans les conditions de l'expérimentation, avec des sols ayant un pool organique minéralisable élevé, les apports organiques n'ont pas un effet direct important, en particulier pour le groupe A (retournements de prairies) et le groupe C (difficultés de minéralisation dues aux problèmes de structure rencontrés). La meilleure efficacité du fumier se trouve dans les groupes B et D, pour lesquels les conditions de minéralisation sont en général bonnes et permettent une décomposition rapide du fumier.

Le CAU des apports tant organiques que minéraux est faible par rapport aux références connues. De même, l'équivalence engrais des fumiers est en moyenne inférieure aux références, sauf pour les groupes B et D qui ont en général de bonnes conditions de minéralisation des apports organiques. Lorsque les fournitures du sol en

azote sont élevées, les nutriments azotés sont correctes, même pour les témoins zéro. Ceci s'explique par le fait que les rendements sont donc proches de l'optimum de la courbe Fournitures en azote - Rendement. Par conséquent, l'efficacité de l'azote apporté, assimilable à la pente de cette courbe, est donc voisine de zéro. Ces résultats posent question par rapport à l'extrapolation de références usuelles pour le calcul de la fertilisation azotée du maïs dans des conditions similaires aux nôtres (fumure organique antérieure élevée et retournements de prairies).

Conclusion

Le niveau de fertilisation organique testé semble amplement suffisant, ce qui rejoint les recommandations faites par le Programme d'action Bretagne de 1990 : pour une production de 14 t MS, 30 t de fumier et 100 kg/ha de 18-46 (soit 18 kg N/ha) en complément suffisent. Apporter plus d'azote ne procure pas d'augmentation de production. Dans nos conditions culturales, ces doses sont encore trop importantes, si on en juge par les reliquats de fin de culture. Cependant, nous montrons que les réponses à l'azote dépendent des groupes de parcelles. Ceci implique des références très localisées pour mieux gérer la fertilisation azotée. De plus, nos expérimentations montrent que l'impasse en azote une année donnée se rattrape bien l'année suivante ; le potentiel n'est donc pas affecté.

De même, nous avons montré que la fertilisation minérale faible (30-50 kg N/ha au stade 5-7 feuilles) ne pouvait se justifier que comme un effet palliatif d'un mauvais démarrage de la végétation et de la minéralisation au printemps. Elle est donc à conseiller pour le groupe A. En cas de printemps chaud, elle pourrait être supprimée. Pour les autres groupes, cet apport peut être supprimé, à conditions que l'on soit particulièrement vigilant sur la qualité du profil cultural (liée aux implantations et aux charrois).

Les résultats T0 et TON montrent que, dans le cadre d'un cahier des charges en vue d'une conduite "environnementale", il conviendrait d'avoir des apports de fumier encore plus faibles, 10 à 15 t/ha, mais il faudrait garder un apport d'azote minéral de l'ordre de 30 à 40 kg N/ha en cours de végétation, pour compenser la difficulté de démarrage de la minéralisation au printemps. Le suivi d'un indice de nutrition azotée en début de culture pourrait s'avérer pertinent comme outil de pilotage, permettant de décider de l'apport. Un pilotage de la fertilisation minérale devrait être étudié, à partir du suivi de l'alimentation azotée du peuplement, les besoins en azote étant calculés sur la base d'un bilan prévisionnel, intégrant les résultats précédents : objectif de production et fourniture en azote du sol.

Cependant, dans nos conditions, tout apport d'azote, minéral ou organique, s'il procure une augmentation de production, augmente le reliquat d'azote à la récolte. Ce dernier reste relativement important (supérieur à 50 kg N/ha), même dans les parcelles non fertilisées. Le potentiel de fourniture du sol est donc très élevé et il sera difficile de limiter les fuites hivernales. Une analyse de l'intérêt de cultures intercalaires ou intermédiaires dans ou après le maïs ensilage devrait être entreprise. La mise en place de ces cultures devrait être systématiquement envisagée, en étudiant ou non leur utilisation par les animaux.

Diminuer les apports de fumier pour des questions relatives à l'azote est intéressant, mais il ne faut pas oublier les autres éléments contenus dans ces effluents. On montre par ailleurs que les doses réduites de fumier permettent un maintien, voire une augmentation, des teneurs du sol en éléments minéraux, alors que les pratiques des agriculteurs les font très vite monter au-delà des seuils d'impasse, que ce soit pour P ou K. Dans un premier temps, les agriculteurs pourraient se passer d'apporter des engrais minéraux phosphopotassiques sur maïs. Ces évolutions de teneurs relativement rapides, du fait du faible pouvoir tampon des sols, plaident encore pour un report des fumiers sur les prairies qui généralement sont moins fortement fertilisées. Le compostage du fumier permettrait de diminuer encore les apports sur maïs et de reporter les excédents de fumier sur prairies (Hacala *et al.*, 1999).

En outre, l'étude des possibilités d'adaptation des systèmes de production à ces nouvelles pratiques (diminution de la dose de fumier sur maïs, mise en place de cultures intercalaires, compostage et apports sur prairies) doit être entreprise pour améliorer leur adoption par les agriculteurs.

Cependant, la question de l'intérêt de la fumure organique du maïs ensilage reste posée dans le contexte de l'étude du fait de la non-récupération de l'azote minéralisé en automne et de la forte capacité de minéralisation des matières organiques de ces sols. Jusqu'à quel niveau pourrait-on réduire la fertilisation organique sur maïs ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bodet et al. (2001) : *Fertiliser avec les engrais de ferme*, IE, ITAVI, ITCF, ITP, 104 p.
- Desvignes P., Bodet J.M. (2000) : "La fertilisation du maïs fourrage dans les exploitations d'élevage", *Fourrages*, 163, 275-281.
- Hacala S. et al. (1999) : "L'utilisation des engrais de ferme pour fertilisation azotée des prairies", *Fertilisation azotée des prairies de l'Ouest*, 75-96 Chambre d'Agriculture de Bretagne.
- Programme d'action en Bretagne (1990) : *Valoriser les déjections animales*, Programme d'action en Bretagne, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, 39 pages.
- Robert F. (1999) : *Potentiel de production en maïs ensilage en zone cristalline de l'Est du Massif Central*, MFE ESITPA, 58 p + annexes.
- Ziegler D., Heduit M. (1991) : *Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion, environnement*, ITP, ITCF, ITEB.

SUMMARY

Nitrogen fertilization of silage maize on the eastern slopes of the Massif central. II - Organic and mineral fertilization policy

The eastern slopes of the Massif central (départements "Rhône" and "Loire") cover a great diversity of aspects, and large amounts of farmyard manure are applied before the silage maize crop. The question of the efficiency of utilization of this manure and of the mineral fertilizers applied in spring is addressed by a network of experimental plots where various fertilizing policies are compared in different kinds of situations and where the possibilities of lowering the fertilizer rates are analyzed.

Various policies have been tested on some 20 plots, during 4 years : the farmer's policy (AGRI : 40-50 t f.y.m./ha), a reduced amount (DR : 20 t/ha), and a control without organic nitrogen (T0), each one supplemented or not by additional mineral nitrogen (50 kg N/ha, DRN and T0N). The same results are obtained (with comparable indices of nitrogenous nutrition) with the reduced amount supplemented by mineral nitrogen (DRN) and with the farmer's policy (AGRI). The efficiency of organic and of mineral nitrogen, with variations according to the zones, is below the norms (direct effect). The residues after harvest remain considerable, because of the larger nitrogen-supplying power of the soil. Smaller amounts of farmyard manure than those tested should be contemplated, together with some mineral nitrogen added, and with catch-crops or intermediate crops that will take up the nitrogen excesses.