

Fertilisation azotée du maïs ensilage sur la bordure est du Massif central.

I - Choix des potentiels de production et de fourniture du sol en azote

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

Sur la bordure est du Massif central (Rhône et Loire), une grande partie des effluents d'élevage (fumier principalement) est épanchée avant maïs ensilage. La fertilisation azotée du maïs, souvent excessive, peut être conduite plus finement grâce à l'obtention de références locales.

RESUME

Un réseau de parcelles (20 par an pendant 4 ans), a permis de préciser les potentiels de production (définis à partir des parcelles d'essai sans contrainte azotée) et de fourniture en azote du sol (calculée à partir des témoins sans azote) pour mieux piloter la fertilisation azotée selon différentes stratégies. Dans ce premier article, nous présentons une typologie des parcelles basée sur certaines contraintes du milieu, définissant ainsi des zones pédoclimatiques. Les résultats varient beaucoup selon les années et le type de parcelle (de 7 à 17 t MS/ha). Les valeurs retenues selon le type de parcelle permettent de donner, par zone, des éléments de pilotage de la fertilisation azotée pour deux types de stratégie : une stratégie de maximisation de la production et de limitation des risques, et une stratégie pour les zones vulnérables (ressource en eau).

MOTS CLES

Azote, bilan d'azote, développement agricole, diagnostic, fertilisation organique, fertilisation raisonnée, maïs, Rhône-Alpes.

KEY-WORDS

Agricultural development, diagnosis, maize, nitrogen, nitrogen balance, 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.

Introduction

* La reconnaissance progressive de la valeur des engrais de ferme...

Jusque dans les années 80, les fumiers et autres effluents d'élevage étaient souvent considérés comme des "déchets", possédant cependant des valeurs "d'amendement organique". Ils permettaient, sinon d'assouplir le sol, du moins de maintenir un "bon complexe argilo-humique".

Dans les calculs de fertilisation, on oubliait complètement les valeurs fertilisantes (N, P, K) de ces sous-produits, valeurs peu mesurées d'ailleurs, mais déduites le plus souvent d'anciens répertoires d'agronomie.

La "relance agronomique" en France, à partir de 1983, a permis à certains départements, comme la Drôme, la Loire et l'Ain dans la région Rhône-Alpes, de constituer un premier référentiel des valeurs fertilisantes de ces déchets d'élevage, rebaptisés "engrais de ferme" pour la circonstance.

Gueydon (1992) a montré alors que les engrais de ferme sont beaucoup plus riches que ceux des élevages des années cinquante, et que leurs valeurs fertilisantes dépendent directement de l'alimentation et du niveau de production des animaux.

Bonnet (1992) propose une méthode pour conduire la fertilisation azotée des prairies dans les monts du Lyonnais, et le développement du logiciel de "Plan de Fumure à l'échelle de l'exploitation agricole" dès l'année 1985 permet la prise en compte des valeurs fertilisantes P et K des engrais de ferme dans le raisonnement de la fertilisation (Vinatier *et al.*, 1987).

Des essais, réalisés entre 1985 et 1991 sur des prairies dans trois situations pédoclimatiques du nord-est du Massif central, ont montré les pertinences technique et économique de l'utilisation des fumiers de bovins (Gueydon *et al.*, 1994).

Cependant, le maïs ensilage, base de la ration hivernale des bovins, reste le "réceptacle" principal des fumiers de ferme, épandus à doses élevées et mal contrôlées, aussi bien pour des raisons pratiques que de sécurisation des productions.

Des travaux sur l'estimation des fournitures d'azote du sol pour le maïs par des témoins non fertilisés en azote ont notamment souligné que, dans nos régions d'élevage, les fertilisations minérales complémentaires à des apports de 40 à 50 t/ha de fumier n'avaient aucun effet sur la quantité de maïs produite (Molines *et al.*, 1999).

* Présentation de l'étude

Des simulations de calcul de fertilisation des maïs ensilage, opérationnelles en 1995, recommandaient aux agriculteurs une diminution des doses d'engrais de ferme et d'engrais minéraux. Il restait à le démontrer dans des situations de plein champ, aux caractéristiques pédoclimatiques différenciées et à obtenir des références régionalisées pour améliorer le conseil.

Un réseau de 38 parcelles a été mis en place pour 4 ans, de 1995 à 1999, sur 3 petites régions du nord-est du Massif central (départements du Rhône et de la Loire), entre 400 et 900 m d'altitude. L'étude a été menée dans le cadre d'un Programme de Recherche Développement (PRD) "Massif central : Gestion de la matière organique", financé par la Région Rhône-Alpes et l'Union Européenne.

Les objectifs de l'étude sont :

- de vérifier l'influence d'une diminution des apports de fumier sur les productions du maïs et les risques de pollution, sans nuire au résultat économique des exploitations,
- de prendre en compte la variabilité des situations culturales et pédoclimatiques pour améliorer les conseils aux éleveurs,
- et de profiter des expérimentations pour avoir un effet de démonstration auprès des agriculteurs.

Dans un premier texte, nous abordons tout d'abord, la présentation de la zone couverte par l'étude, tant par son milieu naturel que par la place du maïs dans les systèmes fourragers et du protocole d'étude. Puis, nous analysons les productions obtenues en alimentation azotée non limitante et les fournitures en azote du sol sur les témoins non fertilisés. Nous en tirons pour les différentes zones les deux éléments essentiels pour le pilotage de la fertilisation azotée : le choix du potentiel de production pour le maïs ensilage et de la

quantité d'azote minéral fourni par le sol. Dans un deuxième article nous présenterons les principales conclusions des expérimentations pour en tirer des éléments de conseils dans la conduite de la fertilisation azotée du maïs ensilage.

Présentation de la zone d'étude

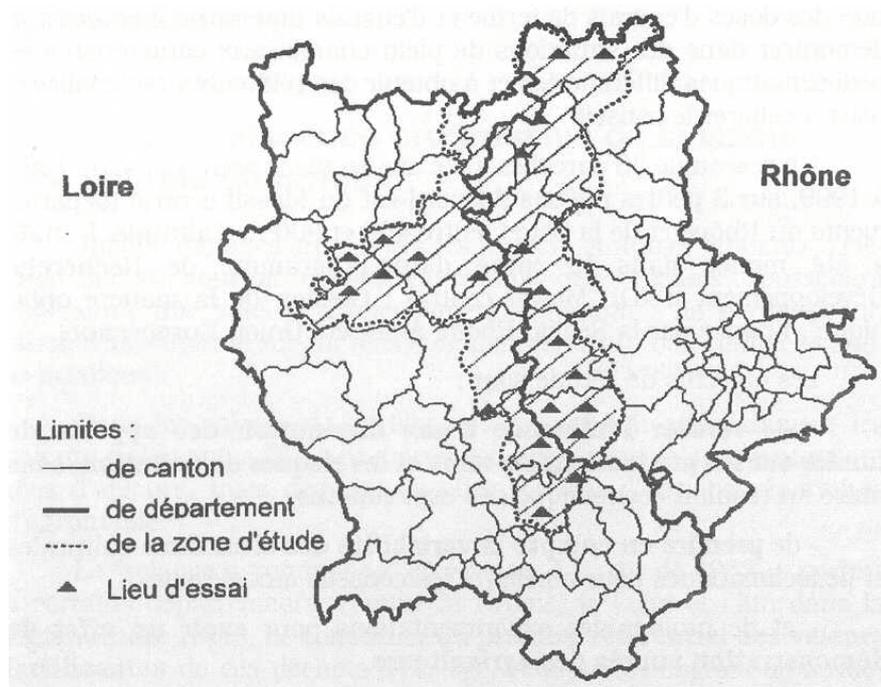
1. Le milieu naturel

Située en coteaux et demi-montagne, la zone concernée par l'étude est très différenciée tant par ses caractéristiques pédologiques que climatiques. Trois régions naturelles la composent : Les Monts du Beaujolais, les Monts du Lyonnais, le Plateau de Neulise (figure 1).

Au nord, la région des Monts du Beaujolais, assez arrosée (moyenne annuelle : 1 050 mm), 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 (850 mm en moyenne annuelle), 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, plus sèche (750 mm en moyenne), 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.

Figure 1 : Localisation des essais conduits sur la fertilisation du maïs ensilage en bordure est du Massif central.

Figure 1 : Location of the experiments on silage maize fertilization, on the eastern slopes of the Massif central.



* Le climat

La zone d'étude est à un carrefour climatique où se retrouvent trois influences :

- continentale avec des chaleurs estivales élevées et des hivers rigoureux,
- océanique marquée sur les zones les plus boisées où la pluviométrie est forte surtout en hiver, printemps et automne,
- méditerranéenne avec une sécheresse estivale forte, sensible sur les zones les plus basses, particulièrement au sud de la zone.

En moyenne, le climat est sec en été et pluvieux au printemps et en automne. L'arrivée d'orages au moment de la floraison du maïs peut permettre de bons niveaux de production. Une période de froid en juin limite souvent la minéralisation de la matière organique et la fourniture en azote pour le maïs. Un effet de fœhn est particulièrement sensible, avec des précipitations plus fortes sur le versant ouest des Monts du Lyonnais et du Beaujolais, par opposition au plateau de Neulise par exemple. De plus, les épisodes pluvieux de l'automne peuvent entraîner des lessivages importants d'azote.

Compte tenu du climat (sécheresse d'été, pluies d'automne et de printemps fortes), l'hétérogénéité de production est importante, rendant ainsi les risques de lessivage de l'azote élevés. Pour limiter les fuites d'azote minéral, les pratiques de fertilisation excessive doivent être améliorées, en lien avec des objectifs de production raisonnables, compte tenu de la potentialité des sols.

* Les sols

Dans les Monts du Lyonnais, les sols à texture dominante sableuse reposent sur un substrat géologique principalement de granite ou de gneiss, et parfois des micaschistes. Dans les Monts du Beaujolais, les sols se sont développés sur une arène issue le plus souvent du micro-granite. Ils sont de texture sableuse à sablo-argilo-limoneuse, avec présence fréquente de cailloux. Sur le plateau de Neulise, les sols sablo-graveleux, peu épais, reposent sur un substrat géologique ancien, antérieur à la mise en place des granites des régions voisines, et composé de rhyolites et tufs volcaniques primaires. Au contact des plaines, on peut trouver des lambeaux d'anciennes terrasses alluviales.

Les dominantes principales des sols de ces 3 petites régions sont :

- des sols développés sur des substrats anciens et cristallins de l'ère primaire, à texture de base sableuse ou sablo-graveleuse, toujours acides (entre 5,5 et 6,3) ;
- une forte influence de la topographie : la profondeur et la teneur en argile des sols sont variables qui sont ainsi plus squelettiques en haut de pente, profonds et plus argileux dans les bas de pentes, avec de l'hydromorphie dans les thalwegs (Vinatier, 1997), ce qui va beaucoup influencer la croissance des plantes ;
- un déficit hydrique estival qui accentue ces contraintes pédologiques pour les cultures de printemps.

2. Les types d'exploitations

* Les structures d'exploitations

Les exploitations de chaque zone sont assez différentes tant par leur structure que par leurs productions ou leurs pratiques.

Les Monts du Lyonnais sont la zone la plus intensive, avec des exploitations laitières spécialisées ou diversifiées avec des fruits rouges ou un atelier hors-sol. Les surfaces sont faibles (20 à 25 ha par unité de main d'œuvre (UMO)) et le chargement animal souvent supérieur à 1,5 UGB/ha de surface fourragère. Le maïs représente plus de 20% de la surface fourragère. Il revient très souvent sur les mêmes parcelles. Les rotations sont courtes (céréales, ray-grass d'Italie, maïs). Le ray-grass d'Italie est très présent, souvent cultivé en dérobée entre deux maïs.

Les Monts du Beaujolais sont une zone plus herbagère avec parfois une diversification viande (vaches allaitantes). Les surfaces sont plus importantes et le chargement est moindre, avec des volumes de production identiques à ceux des Monts du Lyonnais. Le maïs représente de 10 à 20% de la surface fourragère et entre dans des rotations longues après des prairies de longue durée. Ces rotations sont du type : céréales, prairies de 5 à 7 ans, maïs 2 à 3 ans.

Le Plateau de Neulise est une zone intermédiaire entre les Monts du Lyonnais très laitiers et le bassin charolais du Roannais et de Saône-et-Loire. Les chargements se situent entre 1 et 1,3 UGB/ha avec une augmentation en présence d'irrigation. La proportion de maïs, semblable à celle des Monts du Beaujolais, est plus faible dans les exploitations sans irrigation ou lorsque la taille du troupeau allaitant augmente. Les rotations sont plus longues que dans les Monts du Lyonnais avec 1 à 2 ans de céréales, 2 à 3 ans de prairies (souvent du ray-grass d'Italie) et un an de maïs.

* Les pratiques d'épandage

Bourreau (1996) confronte pratiques de fertilisation et perceptions du fumier par les éleveurs de la zone d'étude :

- 10% considèrent le fumier comme un simple amendement pour la structure du sol et ne l'utilisent que sur maïs à fortes doses (50 à 70 t/ha).
- 60% le considèrent comme une fumure de fond (P, K) et l'apportent surtout sur maïs qui est considéré comme une plante "*gourmande*".
- 30% le considèrent comme un fertilisant complet (N, P, K), modèrent son emploi sur maïs et l'utilisent sur prairies. Les doses d'apport sont "faibles à moyennes" (35 à 45 t/ha).

Les apports réguliers de fumier sur prairies ne sont pratiqués que par 10% des éleveurs alors que 33% utilisent le fumier uniquement sur maïs. Pour résumer, la fertilisation des maïs est caractérisée par :

- des apports de fumier excessifs et quasiment exclusifs pour cette culture, et une faible utilisation de la prairie comme surface réceptrice,
- une "*offre*" en matière organique importantes en cas de fort chargement ou d'élevage hors-sol complémentaire,
- une perception "*minimaliste*" du rôle du fumier, avec fréquemment pratique d'apports minéraux complémentaires.

Protocole d'étude

1. Objectifs de l'étude

La diversité (pédoclimat et modes d'utilisation : successions culturales, irrigation...) de ces trois régions agricoles nécessite des références adaptées à chaque situation. Le choix a donc été fait de multiplier les parcelles du réseau et de les répartir dans diverses exploitations des deux départements (Rhône et Loire), ce qui conforte le rôle de démonstration que nous voulions donner à ces essais.

Les exploitations ont été choisies (figure 1) pour la représentativité des types de successions culturales présentes dans les trois régions agricoles :

- 5 exploitations dans les "Monts du Beaujolais", avec des successions de maïs sur prairies de longue durée en zone arrosée ;
- 10 exploitations des "Monts du Lyonnais" avec des successions de courte durée (maïs en dérobé après ray-grass) ou des rotations de type céréales/ray-grass/maïs ;
- 5 exploitations du "Plateau de Neulise", avec des retours du maïs tous les trois à cinq ans ; 2 des exploitations pratiquent l'irrigation, et les autres sont en zones plus séchantes.

Les agriculteurs choisis réalisent tous un plan de fumure avec le logiciel de prévision de la fertilisation "*Clé de Sol*" créée par la Chambre d'agriculture des Pays-de-la-Loire. Les parcelles retenues ont toutes fait l'objet d'une analyse de terre et d'un bilan azoté (Apports - Exportations sur les 4 ans précédant l'expérimentation).

La durée du réseau et des observations a été programmée sur 4 ans afin de prendre en compte la variabilité climatique. Chaque année, nous cherchions à avoir des parcelles en première année de maïs et d'autres avec une succession de maïs sur plusieurs années. Ainsi, 11 parcelles ont eu au moins 3 maïs consécutifs. Au total, 38 parcelles ont ainsi été suivies entre 1995 et 1998 avec un effectif moyen annuel de 20 à 22 parcelles, et 22 agriculteurs ont participé au réseau.

L'étude a porté uniquement sur les fumiers, du fait de leur usage presque exclusif en culture de maïs. Les lisiers sont en effet plus souvent épandus sur prairies.

2. Le protocole d'expérimentation

L'objectif est de montrer l'effet d'une réduction de l'ordre de 50% de la quantité de fumier habituellement épandue (50 t/ha au minimum) et d'un faible apport d'azote minéral en cours de végétation du maïs pour compenser les difficultés de minéralisation dues aux printemps souvent frais.

* Présentation des traitements expérimentaux

Les traitements expérimentaux sont les suivants :

- T0 : Témoin zéro azote : aucun apport, ni minéral, ni organique.
- T0N : Témoin zéro + azote minéral uniquement 50 kg N/ha, apporté au stade 5-7 feuilles.
- DR : Dose de fumier réduite : environ 25-30 t/ha selon les situations.
- DRN : Dose de fumier réduite + azote minéral (50 kg N/ha au stade 5-7 feuilles).
- 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 (principalement sous forme de phosphate d'ammoniaque), et parfois par des engrais PK.

Le nombre moyen des traitements est de 7 par essai, sans répétition. Les parcelles expérimentales mesurent 10 m de large et 30 m de long. L'épandage de fumier est fait avec l'épandeur de l'agriculteur. Les quantités épandues sont pesées à chaque traitement.

Les traitements T0 et AGRI servent de points de comparaison. En plus de ces traitements, afin d'estimer les effets indirects des apports de fumier, sur 2 parcelles se succèdent, alternativement, Témoin zéro et Dose Réduite. Les comparaisons DR/DRN et T0/T0N serviront à estimer les efficacités de l'azote minéral. Les comparaisons DR/T0 et DRN/T0N donneront des éléments sur l'efficacité directe des fumiers.

* Les protocoles de mesures et d'observation

- Pour les plantes : Les mesures (nombre de pieds par m², poids de matières fraîche et sèche, et teneurs en azote des tiges et des épis) et les prélèvements correspondants ont été effectués en trois endroits différents pour chaque parcelle de maïs, sur des placettes de 10 m par rang. Les teneurs en P₂O₅ et K₂O ont été mesurées sur deux ou trois traitements. Ces données ont permis de calculer les productions, les teneurs en matière sèche, les exportations en azote, phosphore et potassium, l'indice de nutrition azotée, la valeur alimentaire de l'ensilage et les prélèvements en azote. Les mesures de productions étant effectuées sur de petites surfaces, moins hétérogènes que les parcelles des agriculteurs, il convient de les réduire de 10 à 15% pour obtenir un objectif de production "agriculteur". De plus, toutes les conditions de culture et accidents étaient notés.

Tableau 1 : Les caractéristiques des groupes de parcelles établis pour la bordure est du Massif central.

Table 1 : Characteristics of the plot groups defined for the eastern slopes of the Massif central.

Contraintes hydriques	Contraintes thermiques	Localisation et description	Groupes	Effectif (n)
Non	Oui	Monts du Beaujolais, avec fortes précipitations et altitude élevée	A	20
Non	Non	Plateau de Neulise, avec irrigation et sols superficiels, ou Monts du Lyonnais avec sols profonds	B	29
Oui	Non	Monts du Lyonnais avec sols à structure dégradée	C	18
Oui	Non	Plateau de Neulise, sols superficiels non irrigués	D	10
Oui	Oui	Monts du Lyonnais, sols superficiels, à forte teneur en matière organique	E	7

– Pour le sol : Des analyses de terre complètes ont été faites en début et en fin d'essais (pour ceux qui ont duré plusieurs années). Les reliquats d'azote minéral ont été systématiquement mesurés après récolte sur la profondeur du profil et pour chaque traitement. Après la récolte, 24 profils culturaux ont été effectués pour cerner d'éventuels problèmes culturaux (tassement, hydromorphie...) et l'effet des successions. Le fumier épandu est analysé chaque année.

– Pour le climat : Sept stations climatiques de Météo France ont fourni les données caractérisant la zone d'étude (pluviométrie, températures) ; une autre a fourni les valeurs d'évapotranspiration, afin d'avoir une estimation du bilan hydrique.

Résultats

Afin d'affiner les résultats du réseau, il est nécessaire d'établir une typologie des différentes situations sur des critères pédoclimatiques et culturaux et de construire des clés d'extrapolation des résultats. Ceci permettra d'affecter chaque parcelle d'agriculteur à un groupe donné présentant un potentiel spécifique.

1. Typologie des parcelles

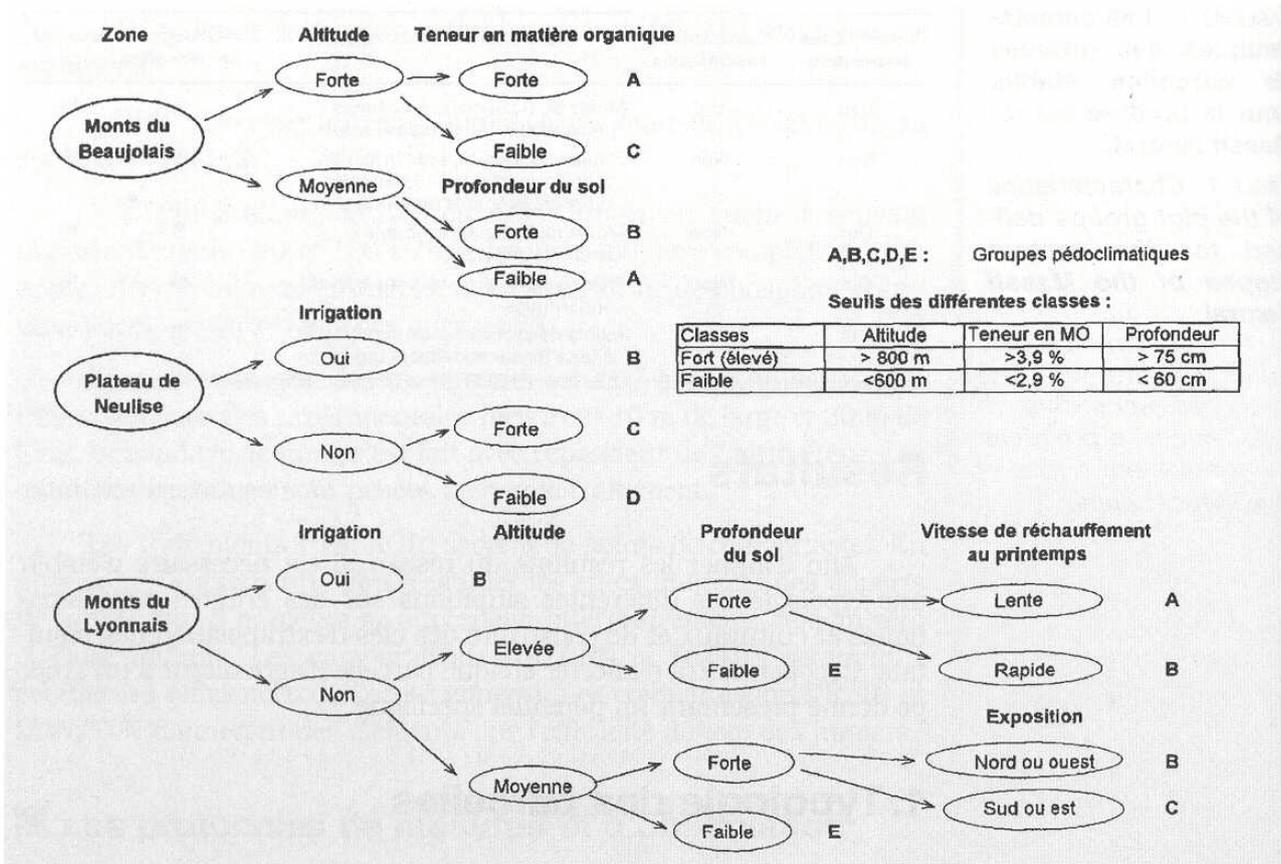
* Les différentes situations

Nous avons caractérisé les différentes situations et regroupé les différentes parcelles, à partir des variables climatiques, géographiques, pédologiques et culturales. Les différentes variables ont été estimées à dire d'experts au début des essais, puis vérifiées sur chacune des parcelles.

La contrainte hydrique est liée à la pluviosité du 1^{er} mai au 30 septembre ; un réchauffement lent au printemps est la principale contrainte thermique. La structure dégradée des sols est le reflet des systèmes de cultures à rotation courte (maïs et ray-grass de 6 ou 18 mois).

Figure 2 : Organigramme de détermination de l'appartenance d'une parcelle quelconque à l'un des groupes définis (d'après Robert, 1999).

Figure 2 : Determining to which of the groups defined a given plot belongs (after Robert, 1999).



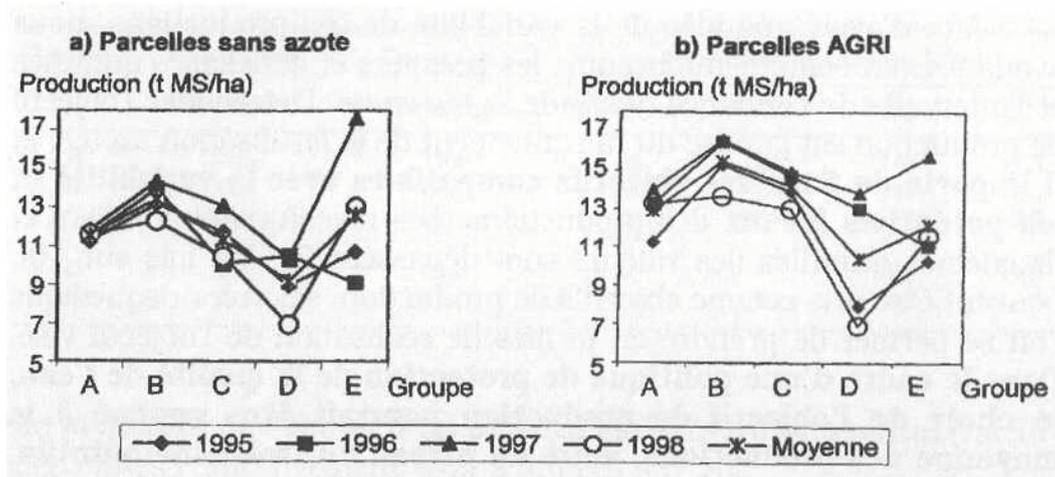
Pour faire ce regroupement, plusieurs analyses factorielles des correspondances (AFC) ont été effectuées, en ne retenant qu'une seule fois la même parcelle (en effet, certaines supportent jusqu'à quatre ans l'expérimentation ; Robert, 1999). Ceci a conduit à un regroupement des parcelles d'essais sur des critères pédoclimatiques et géographiques qui s'est avéré plus pertinent que celui construit sur des critères culturaux (tableau 1). L'affectation des parcelles de la zone couverte par le Programme de Recherche Développement peut être facilement fait avec l'organigramme de la figure 2, issu d'une classification hiérarchique ascendante en cinq groupes. Il permet de classer rapidement une parcelle d'agriculteur pour lui attribuer un objectif de production et une fourniture potentielle d'azote par le sol (Robert, 1999).

* La variabilité des productions

Nous présentons figure 3 les productions enregistrées de 1995 à 1998 pour les traitements T0 (pas d'apports azotés) et AGRI (pratiques de l'agriculteur) : les productions de matière sèche selon les années, les groupes et les traitements sont très variables, de presque 6,9 à 17,6 t/ha.. Les productions des autres traitements seront présentés dans l'article suivant.

Figure 3 : Variabilité de la production a) des parcelles sans apport d'azote, b) des parcelles conduites avec les pratiques de l'agriculteur en bordure est du Massif central.

Figure 3 : Variation of the production of plots a) not receiving any nitrogen dressing, b) fertilized according to the farmer's practice on the eastern slopes of the Massif central.



Le groupe B, aux sols profonds, obtient les plus fortes productions quelle que soit l'année, avec une moyenne AGRI de 15-16 t MS/ha, sauf pour l'année 1998, année pluvieuse, mais à déficit estival marqué.

Les groupes D et E, aux sols superficiels, possèdent les plus faibles productions, avec en moyenne 9-10 t MS/ha pour le groupe D et 12 t MS/ha pour le groupe E avec une très forte variabilité et une forte différence entre les deux traitements. Pour le groupe E, la production 1997 semble se détacher de celles des autres années (15,7 t MS/ha contre 10,3, 11,1 et 11,6 t MS/ha pour les années 1995, 1996 et 1998). Cependant, il est nécessaire de préciser qu'elle n'a été obtenue que sur une seule parcelle. Le groupe D possède des productions catastrophiques en 1995 et 1998 (années de sécheresse).

C'est en 1996 et 1997, années plus humides, que les productions des traitements AGRI, en particulier, sont les plus élevées, quel que soit le groupe de parcelles.

Ces fortes différences de production (moyenne et variabilité interannuelle) entre les zones impliquent de déterminer pour chacune d'elles des objectifs réalistes de production comme de fourniture en azote du sol.

2. Détermination des bases (offre et demande) du raisonnement de la fertilisation azotée

Les modalités de classement des parcelles dans les groupes font intervenir des éléments du pédoclimat et des systèmes de cultures. Ces différences entre les groupes doivent donc aussi jouer sur leur aptitude à produire du maïs ensilage. Celle-ci peut être appréciée par la production potentielle et la fourniture du sol en azote minéral.

* Le potentiel de production

La production potentielle est la production maximale permise dans un système de culture donné et dans un milieu donné, en l'absence de facteurs limitants. Afin de déterminer l'absence de contrainte azotée, nous avons calculé, sur la base des travaux de Plenet (1995), les indices de nutrition azotée (INN) des cultures à la récolte. Les productions dites potentielles sont celles obtenues avec un indice INN supérieur ou égal à 0,9, supposant qu'à ce niveau la contrainte azotée est pratiquement levée.

Le calcul des INN se fait à partir de la formule établie pour le maïs par Plenet (1995) :

$$\text{INN} = \text{Nmes}/\text{Ncrit avec Ncrit} = 3,40 \text{ MS}^{-0,37},$$

Ncrit (en %) : teneur en azote d'un maïs sans contrainte azotée,

Nmes (en %) : teneur en azote mesurée au stade ensilage,

MS (t/ha) : quantité de matière sèche produite,

INN : indice de nutrition azotée.

Afin d'avoir une idée de la variabilité de ces productions, nous avons pris en compte la moyenne, les premiers et deuxièmes quintiles et l'intervalle de confiance (95%) de la moyenne. Déterminer l'objectif de production est la base du raisonnement de la fertilisation azotée, et il importe de fixer des objectifs compatibles avec la variabilité et les potentiels locaux des productions. Les niveaux des premiers et deuxièmes quintiles (les valeurs sont dépassées 2 ou 4 fois sur 10), peuvent être pris comme objectifs de production, selon les risques que l'on se permet de prendre en terme de réalisation de l'objectif visé. Dans le cadre d'une politique de protection de la qualité de l'eau, le choix de l'objectif de production pourrait être ramené à la moyenne des productions, voire au niveau du troisième quintile, de façon à limiter le nombre d'années durant lesquelles les apports azotés sont supérieurs à ce qui est nécessaire à la production.

Les productions moyennes (tableau 2) sont de l'ordre de 13 t/ha pour tous les groupes, sauf le B dont la moyenne est proche de 16 t/ha. La variabilité des productions augmente fortement quand on passe des groupes A et B au groupe E : la fixation d'un objectif de production sera plus fiable pour les deux premiers groupes que pour les derniers.

Tableau 2 : Potentiels de production de maïs ensilage pour les différents groupes de parcelles de la bordure est du Massif central (production mesurée sur des placettes).

Table 2 : Maize production potentials for the various plot groups on the eastern slopes of the Massif central (production measured on micro-plots).

Groupe	Contrainte hydrique	Contrainte thermique	Potentiel de production (t/ha)			
			Moyenne	Q1*	Q2*	IC*
A	Non	Oui	13,2	14,7	13,5	0,54
B	Non	Non	15,5	18,0	16,3	0,57
C	Oui car profil dégradé	Non	13,4	16,5	13,5	0,99
D	Oui	Non	12,2	14,1	12,1	1,05
E	Oui	Oui	12,8	17,6	13,2	1,36

* IC : Intervalle de confiance ; Q1, Q2 : valeur du premier ou deuxième quintile

* La fourniture en azote du sol

La fourniture en azote d'une parcelle s'estime par addition des quantités d'azote exportées par la culture non fertilisée (Nabs T0), des reliquats azotés à la récolte sous le témoin zéro (Nrel T0), ainsi que des pertes par lessivage et dénitrification en cours de culture (non mesurées lors de l'expérimentation).

$$\text{Fournitures du sol} = \text{NabsT0} + \text{Nrel T0}$$

Nrel T0 représente l'azote non utilisé par le maïs pour diverses raisons (problèmes de conditions de nutrition, hydrique en particulier, et de faible absorption d'azote après la floraison).

Dans le cadre du réseau, l'addition de Nabs T0 et de Nrel T0 permet donc une approximation de la fourniture en azote de la parcelle. Afin de tenir compte des quantités d'azote contenues dans les racines et les collets, nous majorons les exportations d'azote de 10%. L'objectif de fourniture du sol peut être fixé au deuxième quintile dans le cadre d'une recherche d'optimum technico-économique, et au premier quintile dans le cadre d'une politique de protection de la qualité de l'eau et d'un objectif agri-environnemental (valeurs dépassées respectivement 4 ou 2 années sur 10).

Les parcelles d'essai supportant plusieurs témoins T0 successifs n'ont pas été retenues pour le calcul de la fourniture du sol. En effet, cette pratique est très éloignée des pratiques habituelles d'apports organiques et ne peut donc pas être utilisée pour la recherche d'une référence.

Les fournitures en azote du sol ainsi estimées (minéralisation et reliquat d'hiver), sont élevées, voisines de 200 kg N/ha par hectare en moyenne (tableau 3), sauf pour le groupe D (150 kg N/ha). Ces hauts niveaux sont liés à l'histoire culturale de la parcelle (retournement de prairies de plus ou moins longue durée, apports antérieurs de fumier importants, et bilan Apports - Exportations élevés, sauf après prairies). Ces historiques des parcelles, quelle que soit la situation, induisent de fortes capacités de minéralisation et des reliquats d'azote en fin d'hiver importants.

Tableau 3 : Fourniture en azote du sol des différents groupes de parcelles de la bordure est du Massif central.

Table 3 : Nitrogen-supplying power of the soil of the various plot groups on the eastern slopes of the Massif central.

Groupe	Contrainte hydrique	Contrainte thermique	Fourniture du sol (kg N/ha)			
			Moyenne	Q1	Q2	IC
A	Non	Oui	88	220	185	17,3
B	Non	Non	207	240	210	12,6
C	Oui car profil dégradé	Non	90	240	215	19,6
D	Oui	Non	50	195	160	17,8
E	Oui	Oui	218	280	195	42,7

Afin de quantifier les historiques azotés des parcelles, nous avons calculé leurs bilans azotés ; cet indicateur établit la somme des fertilisations azotées (minérales et organiques) pour les 4 années précédant l'expérimentation, dont il retranche la valeur azotée estimée des exportations par les cultures. Les bilans sont élevés pour les groupes B, C et D (tableau 4) et faibles, voire négatifs, pour les groupes A et E.

Tableau 4 : Bilans azotés (Apports - Exportations) des parcelles "AGRI" (c.a.d. conduites avec les pratiques de l'agriculteur) sur la bordure est du Massif central.

Table 4 : Nitrogen balances (Inputs - Removals) of the "AGRI" plots (i.e. those fertilized according to the farmer's practice) on the eastern slopes of the Massif central.

Groupe	1995	1996	1997	1998
A	36	57	-72	-72
B	141	161	105	105
C	72	99	89	89
D	38	51	-60	-60
E	149	191	280	280
Moyenne générale	91	110	61	61

Nous avons constaté que les statuts organiques élevés des parcelles (bilan élevé, ou précédent prairie) conduisent toujours à une forte minéralisation pendant la culture du maïs. En effet, quand le bilan azoté est fortement positif, il est lié à des apports organiques et minéraux forts qui minéralisent durant l'essai, et quand il est négatif, c'est qu'un retournement de prairies de longue et moyenne durée a induit une augmentation de la minéralisation très importante. Il est à noter que, dans le même sens, les reliquats de fin de culture sont élevés (55 kg N/ha environ) sur les témoins 0, sauf pour le groupe D (35 kg/ha). Les différences de fournitures du sol correspondent aux écarts des productions permises par les conditions pédoclimatiques. Pour le groupe D, caractérisé par des terrains très séchants, les fournitures du sol estimées, plus faibles, s'expliquent par des conditions peu propices à l'élaboration de la production du maïs et à la minéralisation estivale. Il faut noter aussi la forte variabilité des fournitures en azote pour le groupe E, très liée à un effet de l'année (fournitures particulièrement élevées pour 1997 et 1998 et faibles l'année 1996), et au faible effectif de ce groupe.

Des essais sur des cultures de maïs, avec des témoins sans azote minéral sur maïs, ont été conduits sur ces zones de 1991 à 1995 et conduit aux résultats suivants (Molines *et al.*, 1999) :

- En sols superficiels avec apports de matière organique et forte E.T.P. en été, la moyenne des fournitures du sol se situe à 141 kg N/ha et au moins 102 kg N/ha, 4 années sur 5, quand il y a apport antérieur de matière organique.

- En sols profonds et dans les mêmes conditions, la moyenne des fournitures du sol atteint 166 kg N/ha et dépasse 107 kg N/ha 4 années sur 5, avec une faible fréquence d'apports organiques, et respectivement 221 et 121 kg N/ha si la fréquence des apports est supérieure ou égale à 3 années sur 5.

Pour l'ensemble du réseau, les fournitures d'azote du sol, dans nos essais sont sensiblement supérieures. Elles sont probablement liées au statut organique important de ces sols. L'histoire culturale des parcelles (fortes et fréquentes fertilisations organiques et successions de cultures (prairies de plus ou moins longue durée dans les successions avec maïs)) permet donc de couvrir la plus grande partie des besoins du maïs par les fournitures du sol.

Conclusion

* Quelles stratégies de fertilisation azotée ?

Deux démarches sont envisageables pour raisonner la fertilisation azotée :

- Stratégie 1 : Une maximisation de la production et une minimalisation du risque de contrainte azotée. Ceci conduit à retenir une production élevée comme objectif, avec une prise en compte de fournitures du sol peu élevées et une complémentation par engrais minéral (si nécessaire) de la faible fourniture d'azote par le sol. La prise en compte des fournitures du sol (dépassées 4 années sur 5) pour une prévision de la fertilisation azotée conduit d'autant plus à une augmentation des reliquats en fin de culture.

- Stratégie 2 : Dans des zones de ressources en eau vulnérables (nappes peu protégées, périmètres de protection de captages), c'est la qualité de l'eau qui prime. Dans ce cas, l'agriculteur peut être amené à prendre "plus de risques" pour la culture (sous réserve de compensations éventuelles) et opter pour des objectifs de production moins forts associés à une prise en compte de fournitures du sol plus élevées, avec apport éventuel d'azote.

Deux stratégies plus ou moins contraignantes peuvent donc être envisagées. Dans le cas du groupe B, cela se traduit de la façon suivante : En prenant des objectifs de production égaux à 90% de nos résultats en placettes, la stratégie 1 conduit à choisir un objectif de 16 t MS/ha possible 2 années sur 10, avec des fournitures du sol moyennes de 190 kg N/ha, la seconde à une production de 14,5 t MS/ha et des fournitures du sol de 210 kg N/ha (possibles 4 années sur 10) Notre réseau montre sur plusieurs années que la deuxième stratégie est plus pertinente, tant pour des aspects de production que pour des questions d'environnement. On calcule les besoins en azote en multipliant la production par 12,5 (selon les références, ce coefficient varie de 11 à 14). Après culture, il reste nécessairement une certaine quantité d'azote minéral que l'on peut estimer au moins à 30 kg N/ha pour les sols faiblement fertilisés et à 50 kg N/ha pour les autres.

Selon la stratégie envisagée, la fertilisation azotée varie de 0 à 60 kg N/ha (tableau 5). Dans le cas de la stratégie 1, on apporte 60 kg N/ha afin de tenir compte de l'utilisation non complète des fournitures du sol et du risque de faible minéralisation en début de culture.

Dans le cas de zones où la qualité de l'eau a tendance à se dégrader, le choix des objectifs conduit à ne pas apporter de fertilisants. Cependant, pour la stratégie 2a (tableau 5), il peut être intéressant de contrôler l'alimentation azotée du maïs en début de culture afin d'apporter un éventuel complément en cours de végétation. Si les contraintes environnementales sont fortes, la stratégie 2b peut être envisagée. Elle consiste à choisir comme objectif la moyenne des productions de ce groupe, soit 13 t MS/ha au plus, et retenir comme fourniture du sol 240 kg N/ha (atteintes seulement 2 années sur 10). Ces sols fortement minéralisateurs fournissent des quantités d'azote supérieures aux besoins dans cette stratégie. On peut donc penser que la production obtenue sera supérieure à l'objectif.

Tableau 5 : Choix des objectifs et fertilisation pour le maïs ensilage en bordure est du Massif central.

Table 5 : Choice of objectives and fertilization of silage maize on the eastern slopes of the Massif central.

	Objectif de production (t MS/ha)	Reliquats (kg N/ha)	Besoins (kg N/ha)	Fourniture du sol (kg N/ha)	Apport (kg N/ha)
Stratégie 1	16	50	200	190	60
Stratégie 2a	14,5	30	180	210	0
Stratégie 2b (contrainte plus forte)	13	30	162	240	0

Pour d'autres types de situations, pour lesquelles le potentiel de fournitures du sol n'est pas aussi élevé, la réduction des productions dans la stratégie 2b, sous contrainte forte, induit une extensification. Mais, cela suppose qu'il y ait des surfaces disponibles pour le faire.

*** Limiter encore plus les reliquats**

Les fortes fournitures en azote mises en évidence, conduisent aussi à poser la question de la minéralisation d'automne. Une analyse de l'intérêt et du devenir de cultures intercalaires ou intermédiaires dans le maïs ensilage devrait être effectuée (par exemple, un ray-grass implanté en juin-juillet ou après la récolte du maïs). Le ray-grass d'Italie (reconnu comme un piège à nitrate en interculture) entraîne, s'il est fertilisé pour une récolte, des reliquats importants d'azote. Les reliquats en azote après récolte sont systématiquement plus faibles après maïs en culture principale (diminution de 20 à 30 kg N/ha par rapport à la culture dérobée, résultats non montrés). C'est bien le raisonnement des systèmes de cultures incluant du maïs ensilage dans la succession qui doit être poursuivi et la gestion globale de l'azote dans la succession qu'il faut appréhender, en particulier les successions maïs - ray-grass. De plus, dans les parcelles supportant un, voire deux ensilages chaque année, soit de maïs, soit de prairie (ray-grass le plus souvent), nous avons observé des dégradations importantes de la structure par effet cumulatif de passages répétés d'engins, en conditions parfois limites, perturbent notablement l'enracinement du maïs en profondeur, induisant une moins bonne valorisation des apports (résultats non montrés). Ceci doit être intégré dans le raisonnement. La fertilisation du maïs après un ensilage d'herbe au printemps pourrait être réduite de 15 (groupe B) à 30 kg N/ha (autres groupes), pour tenir compte de la production potentielle plus faible et limiter les reliquats d'azote.

En outre, vu les forts reliquats à la récolte, et l'effet de l'apport d'azote minéral sur la dose réduite en fumier, il faudrait tester dans le cadre d'une conduite plus "environnementale" des apports de fumier encore plus faibles (10 - 15 tonnes) et garder un apport d'azote minéral de l'ordre de 30 à 40 kg N/ha maximum, en cours de végétation.

*** Affiner les outils de prévision**

D'autres questions restent encore posées pour une prévision plus fiable des fertilisations. Les résultats de ce réseau montrent l'intérêt de prendre en compte la forte variabilité pédoclimatique des territoires par des réseaux de parcelles. Cette approche locale doit permettre le test et un paramétrage fin des outils de prévision et d'aide à la fertilisation fournis par les situations en champ d'essais ou en stations expérimentales.

* L'insertion dans l'exploitation

Nos résultats posent également la question de l'évaluation des conséquences sur l'eau et sur l'économie de l'exploitation agricole, en tenant compte des aspects fréquentiels. En effet, viser par exemple, un objectif de production atteint deux années sur dix conduit souvent à des excès d'azote non utilisés par le peuplement. Inversement, parier sur une forte fourniture du sol afin de limiter les apports de fertilisants peut, certaines années, pénaliser la production et par voie de conséquences générer des manques à gagner. En outre, l'étude des possibilités d'adapter les systèmes de production à ces nouvelles pratiques (diminution de la dose de fumier, mise en place de cultures intercalaires ou intermédiaires, compostage et apports sur prairies) devrait être entreprise pour améliorer leur adoption par les agriculteurs.

Accepté pour publication, le 8 juillet 2002

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bonnet P. (1992) : *Fertilisation azotée des prairies*, Lyon, Chambre Régionale d'Agriculture Rhône-Alpes, PRD Massif central, 21 pages.
- Bourreau L. (1996) : *Etude des déterminants des pratiques de gestion des effluents d'élevage. Analyse et diagnostic sur les Monts du Lyonnais, du Beaujolais et Plateau de Neulise, dans le cadre du PRD Massif Central*, ISARA, 69 pages + annexes.
- Gueydon C., 1992 : "Variations de la valeur fertilisante des fumiers et lisiers de bovins. influence de la complémentation, du niveau de production et du type de déjections animales", *Fourrages*, 129, 59-71.
- Gueydon C., Perrolaz G., Drieu Y. (1994) : "Les fumiers de bovins : valeur fertilisantes et intérêt de leur épandage sur les prairies permanentes du nord-est du Massif central", *Fourrages*, 139, 293-300.
- Molines J. et al. (1999) : *Azote du sol absorbé par la culture du maïs, programme Nitrates Rhône-Alpes*, Chambre Régionale d'Agriculture Rhône-Alpes, 9 p.
- Plenet D. (1995) : *Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée, Détermination et application d'un indice de nutrition*, thèse de doctorat, INP de Lorraine, Académie de Nancy-Metz, 247 p.
- Robert F. (1999) : *Potentiel de production en maïs ensilage en zone cristalline de l'est du Massif Central*, MFE ESITPA, 58 pages + annexes.
- Vinatier J.M. (1997) : *Cartographie des sols du Rhône*, Programme IGCS, SOL-CONSEIL/SIRA, Chambre Régionale d'Agriculture de Rhône-Alpes, 64 p.
- Vinatier J.M. et al. (1987) : *Plan de Fumure à l'échelle de l'exploitation*, Chambre Régionale d'Agriculture de Rhône-Alpes, 97 p.

SUMMARY

Nitrogen fertilization of silage maize on the eastern slopes of the Massif central. I- Choice of production potentials and of nitrogen supply by the soil

On the eastern slopes of the Massif central (départements "Rhône" and "Loire"), a large proportion of the farm effluents (mainly farmyard manure) is used (50 t/ha on average) on land prepared for silage maize. The nitrogen fertilization of this crop, often excessive, can be better controlled by using local references regarding the values of production potentials and the nitrogen-supplying power of the soils. A network of experimental plots was set up on farms (20 each year during 4 years) to this purpose. The first paper deals here with the typology of the plots, based on various environmental constraints (altitude, exposure, soil type and structural accidents...) and on the crop succession. The results vary much with the years and with the plot type (from 7 to 17 t DM/ha). The production potential is defined on the basis of experimental plot without nitrogen constraints (from 12 to 15.5 t DM/ha on average, depending on the zone) and the nitrogen-supplying power of the soil is calculated on the basis of the unfertilized controls (from 150 to 218 kg N/ha). Depending on plot type, referential values are given, which make it possible to have some guidance for a nitrogen fertilization policy, with two possible strategies in mind : one for the maximization of production and risk limitation, the other best for vulnerable zones (regarding water resource).