

## RAISONNER LA FUMURE AZOTÉE DU MAÏS

**D**EPUIS MAINTENANT 10 ANS, L'I.T.C.F. A ENGAGÉ UN IMPORTANT PROGRAMME « AZOTE ». CES ÉTUDES ONT PERMIS DE DÉBOUCHER SUR LA MISE AU POINT PRATIQUE d'une méthode de raisonnement de la fumure azotée des céréales à paille. Mais les autres cultures, céréales et fourrages, font également l'objet d'études visant à mettre au point le raisonnement des apports d'azote. Nous sommes actuellement moins avancés pour le maïs que pour le blé, mais plusieurs campagnes d'essais permettent aujourd'hui de proposer des conseils sur la base de la méthode des bilans.

### RAPPEL DU PRINCIPE DE LA MÉTHODE DU BILAN

Il s'agit de faire un bilan prévisionnel d'azote mettant en balance d'un côté un stock d'azote nécessaire et, de l'autre, des fournitures d'azote.

- $bR + a = (FS + E) C$
- b = besoin par quintal
- R = rendement espéré
- a = azote restant dans le sol
- FS = fourniture par le sol
- E = engrais
- C = coefficient d'utilisation de l'azote

Le premier membre de l'équation représente le stock d'azote nécessaire, le second les fournitures. Le coefficient C est aussi parfois appelé efficacité de l'azote.

**FIGURE 1**  
**CALCUL DE LA DOSE TOTALE D'ENGRAIS AZOTÉ**  
**À APPORTER POUR LE MAÏS ENSILAGE**

TABLEAU A: Reliquats		
Type de sol	Profondeur du sol exploitable par les racines	
	moins de 45 cm	plus de 45 cm
Sol sableux ou sol très caillouteux	5	15
Autres sols	10	40

RELIQUATS

+

TABLEAU B: Effets des précédents		
Vieille prairie (plus de 6 ans)	retournée à l'automne	140
	retournée au printemps	100
Jeune prairie (3 à 6 ans)	retournée à l'automne	100
	retournée au printemps	80
Prairie de 1 ou 2 ans	retournée à l'automne	70
	retournée au printemps	50
Autres précédents		0

RESIDUS DE RECOLTE DU PRECEDENT

+

TABLEAU C: Minéralisation de l'humus									
Sols non calcaire	pH	Taux de matière organique							
		1,5 %		2,0 %		2,5 %		3,0 % et plus	
		% argile < 25	% argile > 25	% argile < 25	% argile > 25	% argile < 25	% argile > 25		
	5	30	40	55	50	60	50		
	6	45	60	75	60	90	70		
	6 et plus	60	80	100	80	120	90		
Sols calcaires > 20 % CaCO <sub>3</sub>		50							
Sols superficiels ou/et à teneur en argile < 10 %		30							

MINERALISATION DE L'HUMUS DU SOL

+

TABLEAU D: Anciens retournements de prairies s'il y a une culture entre la prairie et le maïs				
	Type de culture	Type de culture		
		vieille prairie (+ de 6 ans)	jeune prairie (3 à 6 ans)	prairie de 1 à 2 ans
Temps écoulé entre le retournement et le semis	1 an	100	60	20
	2 ans	60	40	0
	3 à 4 ans	40	20	0
	5 à 10 ans	20	0	0

ANCIENS RETOURNEMENTS DE PRAIRIE

+

TABLEAU E: Apport de fumier et de lisier	
Jamais d'apport de fumier ou de lisier	0
Parfois (30 m <sup>2</sup> de lisier ou 30 t de fumier tous les 3 ans)	20
Peu et souvent (30 m <sup>2</sup> de lisier ou 30 t de fumier tous les 2 ans)	40
Peu tous les ans (30 m <sup>2</sup> ou 30 t ou beaucoup tous les 2 ans (60 m <sup>2</sup> ou 60 t))	80
Beaucoup tous les ans (60 m <sup>2</sup> de lisier ou 60 t de fumier)	120

APPORT DE FUMIER OU DE LISIER

+

FOURNITURES DU SOL

=

TABLEAU F: Azote absorbé		
	Kg N/Tonnes MS	Kg N/ Quintal
Besoin en azote	13	2,3

OBJECTIF x DE = RENDEMENT

AZOTE ABSORBE PAR LE MAÏS

+

TABLEAU G: Azote non utilisable			
Type de sol	Sol sableux ou caillouteux		Autres sols
			Sol très humide (consistance plastique)
Conditions de semis du maïs	—		Sol normalement ressuyé
kg N/ha	35	35	70

AZOTE NON UTILISABLE

=

STOCK D'AZOTE NECESSAIRE

DOSE TOTALE A APPORTER =

STOCK D'AZOTE NECESSAIRE

FOURNITURES DU SOL

Le poste FS (fournitures du sol) a été décomposé en 5 termes pour la commodité de son évaluation :

- reliquat d'azote minéral disponible ;
- minéralisation de l'humus du sol ;
- effet des résidus de récolte du précédent ;
- arrière-effet des anciennes prairies ;
- effet des apports de fumier et lisier.

Ayant ainsi décrit les postes du bilan, il reste à proposer les moyens de les évaluer en fonction de la situation propre de chaque parcelle et de son histoire culturale.

La figure 1 regroupe en 7 tableaux les données nécessaires au calcul prévisionnel de la fumure azotée du maïs ensilage.

Ces chiffres constituent des données provisoires qui seront affinées et précisées lorsqu'un plus grand nombre d'essais aura été réalisé.

Pour le moment, nous pouvons discuter les différents postes du bilan à la lumière des essais ensilage déjà disponibles.

## LE STOCK D'AZOTE NÉCESSAIRE

### 1. Les besoins de la plante

#### a) Répartition dans le temps

La courbe d'absorption de l'azote, représentée sur la figure 2, appelle deux remarques :

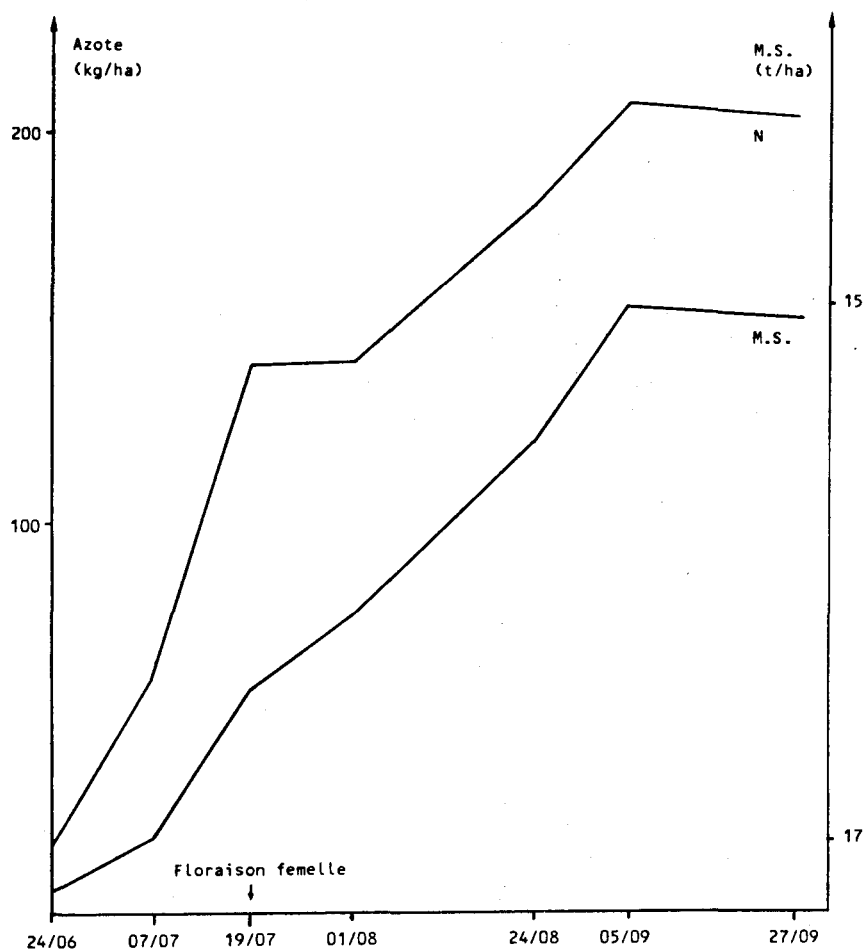
— La phase d'absorption intense d'azote commence au stade 8 feuilles et s'arrête au brunissement des soies. Cette phase peut être scindée en deux parties : la partie « 8 feuilles-floraison femelle », dans laquelle se mettent en place la matière sèche de l'appareil végétatif et le potentiel de reproduction ; celui-ci va ensuite borner supérieurement le nombre de grains par m<sup>2</sup> ; la partie « floraison femelle-brunissement des soies », pendant laquelle commence le grossissement des grains et leur remplissage.

Il est clair que c'est dans la première partie (« 8 feuilles-floraison femelle ») que de l'azote en grande quantité doit être disponible pour la plante afin de maximiser le potentiel de reproduction. Remarquons par ailleurs que le besoin instantané d'azote est moins intense dans la seconde partie et pourra probablement être suffisamment couvert par la minéralisation du sol.

— L'azote apporté au semis restera au minimum deux mois dans le sol avant la phase d'absorption intense. Le tableau I donne à titre indicatif la fraction de l'azote total absorbé au cours de différentes phases du développement du maïs.

Cet azote, apporté au moins partiellement sous forme ammoniacale ou uréique, a tendance à se transformer rapidement en nitrate en raison des

**FIGURE 2**  
**COURBE D'ABSORPTION DE L'AZOTE POUR LE MAÏS**  
 (Source A.G.P.M.)



conditions douces et humides régnant habituellement en avril. Mais il peut également être fortement lessivé et/ou réorganisé en cas de période froide et humide courant mai, ce qui est fréquent dans les régions situées au nord de la Loire.

Il apparaît ainsi assez clairement que le fractionnement de la fumure azotée du maïs devrait être la règle, notamment pour les maïs à haut potentiel-grain. Ceci est moins vrai pour des maïs cultivés dans des systèmes avec élevage où les sols libèrent de fortes quantités d'azote et où la dose apportée ne représente qu'un complément, moins important.

**TABLEAU I**  
**FRACTION DE L'AZOTE TOTAL ABSORBÉ**  
**AU COURS DE DIFFÉRENTES PHASES**  
**DU DÉVELOPPEMENT DU MAÏS**

Phase	% de l'azote total absorbé
<i>Levée 8 feuilles</i>	2
<i>8 feuilles, brunissement des soies</i>	85
<i>Maturation</i>	12

*b) Quantité d'azote absorbé*

Il s'agit de fixer le terme  $bR$ . Pour cela, il faut connaître le terme  $b$  et avoir un objectif de rendement  $R$ .

— *Le terme  $b$*

15 essais réalisés entre 1981 et 1983 donnent les valeurs moyennes suivantes :

besoin du maïs pour produire 1 tonne de matière sèche = 12,7 kg N      écart-type = 2,0

— *Le terme  $R$*

C'est là un des points les plus importants, qui conditionne la valeur de la dose d'azote calculée. Il dépend :

- du potentiel « sol » local,
- de la satisfaction des besoins en eau.

Compte tenu de la difficulté d'établir cet objectif de rendement, il est commode de choisir la moyenne des deux meilleurs rendements observés sur le même type de parcelle dans les 5 dernières années.

**2. L'azote restant dans le sol**

C'est le terme  $a$  de l'équation indiquée au début. Il représente une quantité minimale d'azote présente dans le sol au-dessous de laquelle la plante ne s'alimente pas correctement. Cette quantité est, pour le blé, estimée à 10 unités/ha par tranche de 30 cm de sol.

Mais ce terme doit être modifié pour y intégrer l'influence du coefficient  $C$ . On peut en effet écrire :  $bR + A = FS + E$

Compte tenu de l'équation initiale, cela signifie que l'on pose :  $A = a + (FS + E)(1 - C)$ .  $A$  est donc d'autant plus grand que le coefficient  $C$  est faible. L'azote étant mal utilisé, il en reste de grandes quantités dans le sol. On peut approcher  $C$  par l'étude du coefficient réel d'utilisa-

tion de l'engrais grâce au traceur  $^{15}\text{N}$  (isotope lourd de l'azote). Ce type d'étude est en cours, notamment en collaboration avec le C.E.N. de Cadarache.

Les travaux effectués sur blé, plus avancés que sur maïs, ont permis de trouver quelques-uns des facteurs de variation du coefficient C : la structure du sol, la rotation, la date d'apport par rapport à la phase d'absorption intense et certains facteurs limitants d'ordre parasitaire.

D'un point de vue pratique, nous considérons que la structure du sol, à travers l'appréciation des conditions de travail du sol au semis peut être prise en compte dans le terme A, c'est ce qui a été fait dans le tableau G de la figure 1.

A défaut d'avoir mesuré le coefficient réel d'utilisation de l'azote dans les essais réalisés par l'I.T.C.F., une approche peut être réalisée à partir du coefficient apparent d'utilisation (C.A.U.) calculé de la façon suivante :

$$\text{C.A.U.} = \frac{\text{azote absorbé par le maïs fertilisé} - \text{azote absorbé par le témoin sans N}}{\text{azote engrais apporté}}$$

La moyenne du C.A.U. trouvée sur 11 essais ensilage est de 0,5. On est donc assez loin du coefficient 0,8 habituellement utilisé. Cependant, il apparaît impossible d'utiliser un coefficient moyen : la disparité entre situations est telle qu'on doit absolument le moduler en fonction de la situation agronomique.

## L'AZOTE FOURNI PAR LE SOL

### 1. Le reliquat d'azote minéral avant la culture

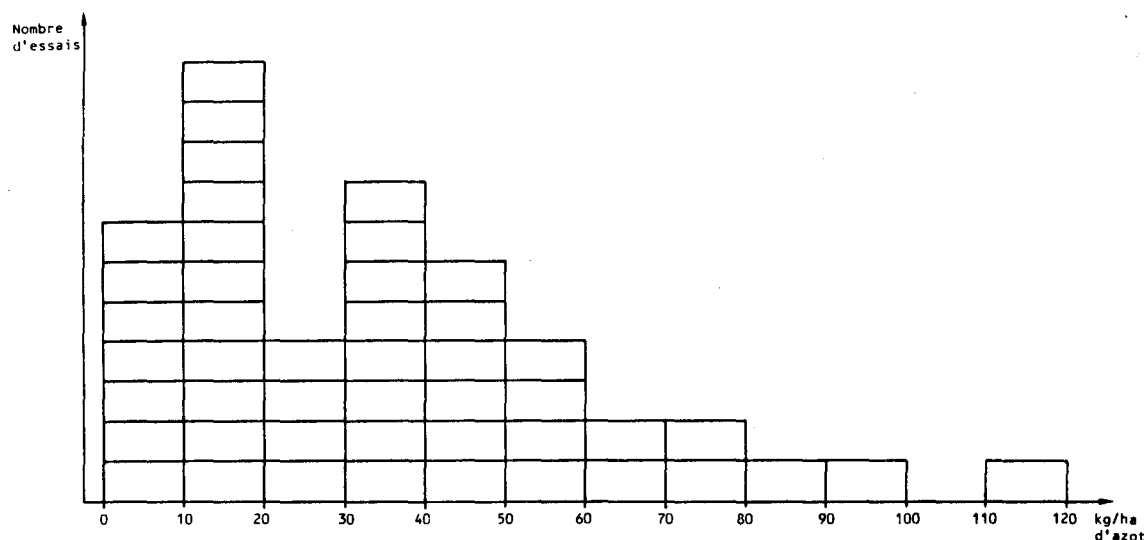
Il s'agit d'estimer la quantité d'azote minéral présente dans le sol avant la culture. Cette quantité peut être élevée en cas de bilan d'azote fortement excédentaire sur le précédent (par exemple fumure forte et rendement faible) ou d'utilisation régulière de fumier ou lisier.

Sur blé, on mesure ce reliquat en février, l'I.N.R.A. ayant démontré que c'est la période à laquelle cette mesure a le plus de sens et de stabilité. Pour les essais « maïs » réalisés de 1981 à 1984, nous l'avons mesuré avant semis, c'est-à-dire en avril et l'étude attentive des résultats laisse penser qu'il y a eu dans certains cas minéralisation avant la mesure (figure 3). Deux questions se posent alors :

- quelle valeur attribuer à ces reliquats mesurés ?
- une mesure en février aurait-elle un sens pour le maïs comme elle en a pour le blé ?

L'absence de mesures à des dates différentes ne nous permet pas de répondre.

**FIGURE 3**  
**HISTOGRAMME DE RÉPARTITION DES RELIQUATS D'AZOTE**  
**NITRIQUE SUR 0-30 cm MESURÉS AVANT SEMIS DU MAÏS**  
 (sur 47 essais I.T.C.F. réalisés en 1981, 1982 et 1983)



## 2. L'effet des précédents

Les chiffres à retenir sont consignés dans le tableau B de la figure 1. L'effet des prairies est très important et celui des autres précédents nul. Il faut noter que le maïs ensilage succède le plus souvent à un blé, à lui-même ou à une prairie.

La vérification de ces chiffres est très difficile car nous manquons d'essais en systèmes à base de prairies.

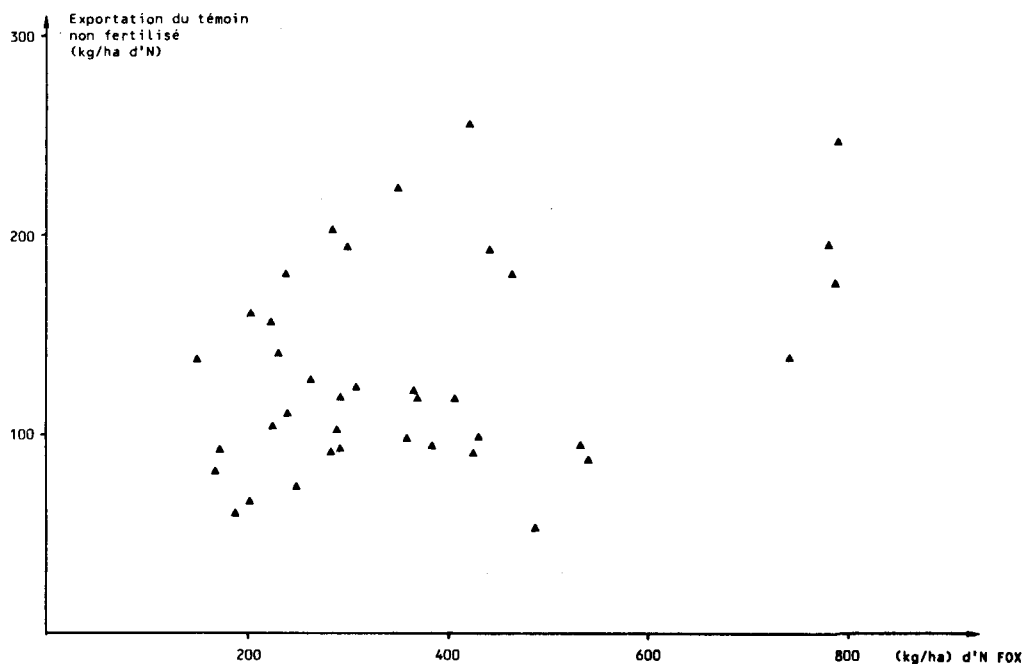
## 3. La minéralisation de l'humus

Elle est sous la dépendance de l'intensité de la vie microbienne du sol et du stock de matière organique. Ce stock de matière organique se décompose en partie chaque année. Certaines conditions sont plus favorables à cette décomposition :

- température et humidité du sol fortes,
- pH > 7 (mais sol non calcaire).

On voit donc qu'en année particulièrement chaude et humide, la libération d'azote provenant de l'humus sera plus importante. Il ne faut pas trop s'en inquiéter car, parallèlement, le potentiel du maïs sera plus élevé et le besoin d'azote supplémentaire sera couvert par cet excédent de minéralisation.

**FIGURE 4**  
**LIAISON ENTRE LES FOURNITURES DU SOL ET L'AZOTE FOX**



tests biologiques qui partent de la mesure de la biomasse microbienne du sol, c'est dans ce sens que travaille actuellement l'I.N.R.A. de Laon, et des tests chimiques qui tentent de mesurer une fraction de l'azote organique, dite facilement minéralisable.

Nous avons testé depuis 1981 la méthode FOX qui consiste à extraire l'azote minéralisable par l'eau bouillante. Les résultats sont mis en liaison dans la figure 4 avec l'azote absorbé par le témoin non fertilisé.

On voit que la relation entre l'azote minéralisable FOX mesuré sur l'horizon 0-60 cm et l'azote absorbé par le témoin non fertilisé est très lâche. Cela signifie que cette mesure n'explique pas directement à elle seule la fourniture globale d'azote par le sol. De toutes façons, cette mesure ne pourrait représenter qu'un potentiel de minéralisation c'est-à-dire un maximum. Est-ce à dire qu'il ne s'exprimerait pas dans certains cas de pH faible, déficit hydrique important, structure du sol défavorable ? Il n'est pas facile de répondre à cette question au vu des données dont nous disposons.

#### 4. L'effet des apports de fumier et de lisier

Les lisiers de porc contiennent généralement des quantités importantes d'azote : 4 % du produit brut. Cet azote n'est pas utilisable en totalité par la culture comme le serait celui d'un apport équivalent d'ammonitrate, pour plusieurs raisons :



— Il y a des pertes à l'épandage par volatilisation d'ammoniac (10 à 40 % de l'azote total). Ces pertes sont d'autant plus importantes que le sol est sec et le temps chaud au moment de l'épandage. L'enfouissement immédiat par une façon superficielle limite considérablement ces pertes.

— Il peut y avoir des pertes par lessivage si le produit est apporté à l'automne ou en cours d'hiver.

Les fumiers de bovin ont un effet très différent selon qu'ils sont plus ou moins pailleux. Un fumier pailleux peut mobiliser de l'azote pour se décomposer, provoquant alors une chute de l'azote disponible pour le maïs. A l'inverse, un fumier bien décomposé participe à l'alimentation azotée l'année d'épandage.

Ces produits ont par ailleurs des arrière-effets par fourniture d'azote les années suivantes. Le tableau E de la figure 1 donne des fournitures moyennes confondant effet direct et arrière-effet selon l'importance et la fréquence des apports.

En toute rigueur, il faudrait tenir compte d'un effet direct des engrais de ferme apportés juste avant le maïs et d'arrière-effets d'anciens épandages. Pour cela, on peut consulter la brochure I.T.C.F. « Valeur fertilisante des engrais de ferme ».

## CONCLUSION

Nous donnons sur la figure 5 une comparaison entre les doses d'azote calculées pour le maïs par la méthode du bilan (en utilisant le reliquat mesuré sur 0-60 cm) et les doses optimales observées en essai. Signalons que les écarts de rendement entre les doses  $x$ ,  $x - 50$  et  $x + 50$  ( $x$  est la dose calculée par la méthode du bilan) sont rarement significatifs. Pour déterminer les doses optimales, seuls les écarts de rendement supérieurs à 0,5 t M.S./ha ont été retenus.

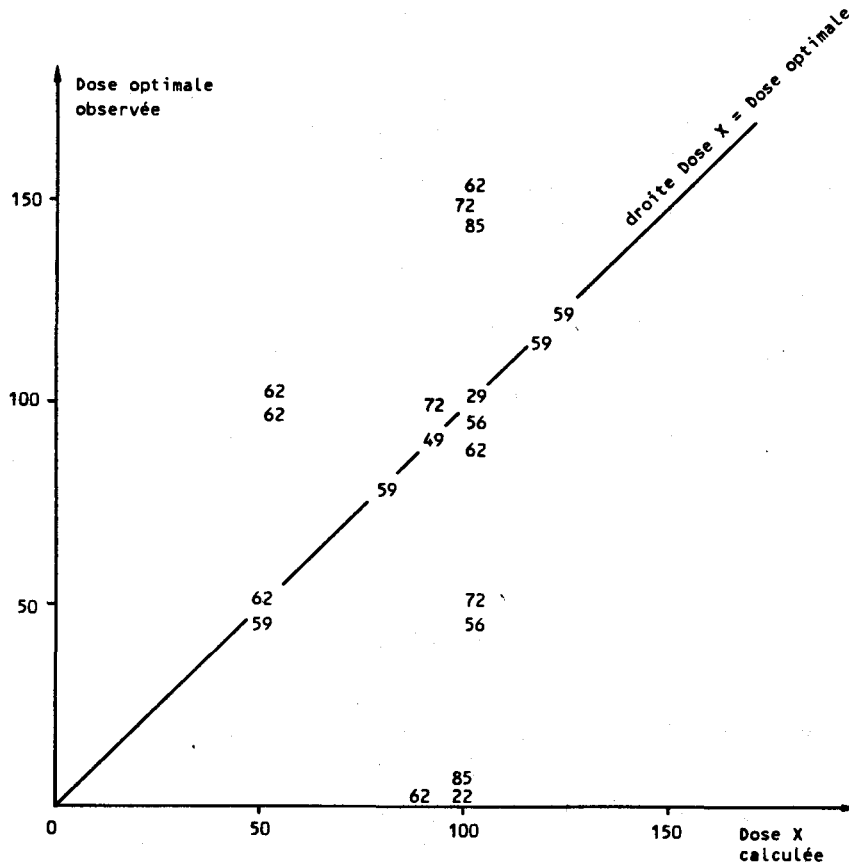
La figure 5 montre que dans la moitié des cas on se situe à la dose optimale par le calcul. Les autres cas se répartissent pour moitié entre des doses insuffisantes et des doses trop fortes.

Dans le cas des doses insuffisantes, il faut bien sûr penser aux problèmes de structure du sol qui limitent l'efficacité de l'azote et donnent lieu à des doses optimales plus fortes que prévu. Les essais ne comportaient pas l'observation de profils racinaires, indispensable à une approche objective de cette question.

La méthode du bilan semble donc pouvoir s'appliquer à la fertilisation azotée du maïs. Des efforts importants restent à faire pour préciser les valeurs données des différents postes du bilan, notamment la fourniture par minéralisation de l'humus.

Pour la pratique de la fumure azotée du maïs ensilage, on peut partir sur une dose calculée par la méthode indiquée et au stade 6 feuilles du maïs,

**FIGURE 5**  
**COMPARAISON DE LA DOSE OPTIMALE OBSERVÉE**  
**AVEC LA DOSE CALCULÉE**  
 (le chiffre repérant chaque essai indique le département)



observer une coupe de sol dans la parcelle : si la structure est jugée défavorable, augmenter la fumure de 50 unités/ha. A noter que ces apports en cours de végétation ne doivent pas être réalisés en plein : il faut pratiquer par enfouissement dans le sol ou en déposant l'engrais juste au niveau du sol.

J.C. TAUREAU et F. LAURENT,  
*I.T.C.F. - Département Production Service Agronomie,*  
*Boigneville (Essonne).*

**LISTE DE MOTS-CLÉS**

62 Fertilisation azotée, fertilisation organique, fertilisation minérale, fertilisation raisonnée, maïs.

*Fertilisation azotée  
 du maïs*