

CH0101627
P242
GAN

Biological Nitrogen Fixation and Sustainability of Tropical Agriculture
Edited by K. Mulongoy, M. Gueye and D.S.C. Spencer
© 1992 IITA
A Wiley-Sayce Co-Publication

4.8

Rôle de la fixation de l'azote par l'arachide dans l'amélioration durable de la fertilité azotée d'un sol sableux tropical par l'amendement calcique et organique

F. GANRY

RESUME

La contribution de la fixation de l'azote à l'enrichissement de l'azote total du sol induite par le fumier est supérieure à celle de la chaux (25 vs. 20 kg N/ha/2ans). Ces amendements accroissent le pool d'azote mobilisable du sol (conventionnellement représenté par la valeur A) avec cependant une nette supériorité du fumier. Seul ce dernier accroît le pool d'azote humique biologiquement stable et peut donc contribuer à améliorer durablement la fertilité du sol.

Plusieurs auteurs (Bouhot, 1968; Blondel, 1971; Pieri, 1976; Ganry, 1977; Pichot et al., 1981; Wey et al., 1987), ont montré que dans les sols sableux dégradés, la fumure minérale ne suffit pas pour maintenir la fertilité; au contraire, son application unique conduit progressivement à une régression sensible de la fertilité et, probablement, de l'activité biologique du sol. En 1956, Bouffal qualifiait déjà, et sans discernement, les engrais minéraux de "poison du sol". L'extériorisation de ce phénomène se traduit en premier lieu par le jaunissement de l'arachide ("tâche jaune") et, à un stade plus avancé, par un "nanisme jaune". Les auteurs ci-dessus cités ont démontré que cette chlorose azotée est causée par une réduction notable de la fixation de l'azote de l'arachide et de la teneur en N du sol. Lors de la mise en place du dispositif expérimental pluriannuel qui a servi de support au présent essai, cette chlorose azotée se manifestait par des taches jaunes, sans distinction de traitements, sur l'ensemble de l'aire expérimentale.

L'objectif de ce dispositif expérimental pluriannuel mis en place à Thilmakha (isohyète 400 mm \pm 100) était triple: (a) régénérer le sol par l'amendement, (b) pouvoir assurer ensuite une production satisfaisante

(objectif de production: 1 t/ha de grains de mil et de gousses d'arachide) avec le minimum d'intrants, (c) agir dans le sens de (a) et (b) afin d'assurer une production minimale sous faible pluviométrie, une situation fréquente dans cette zone devenue subsahélienne à la suite d'une baisse sensible de la pluviométrie.

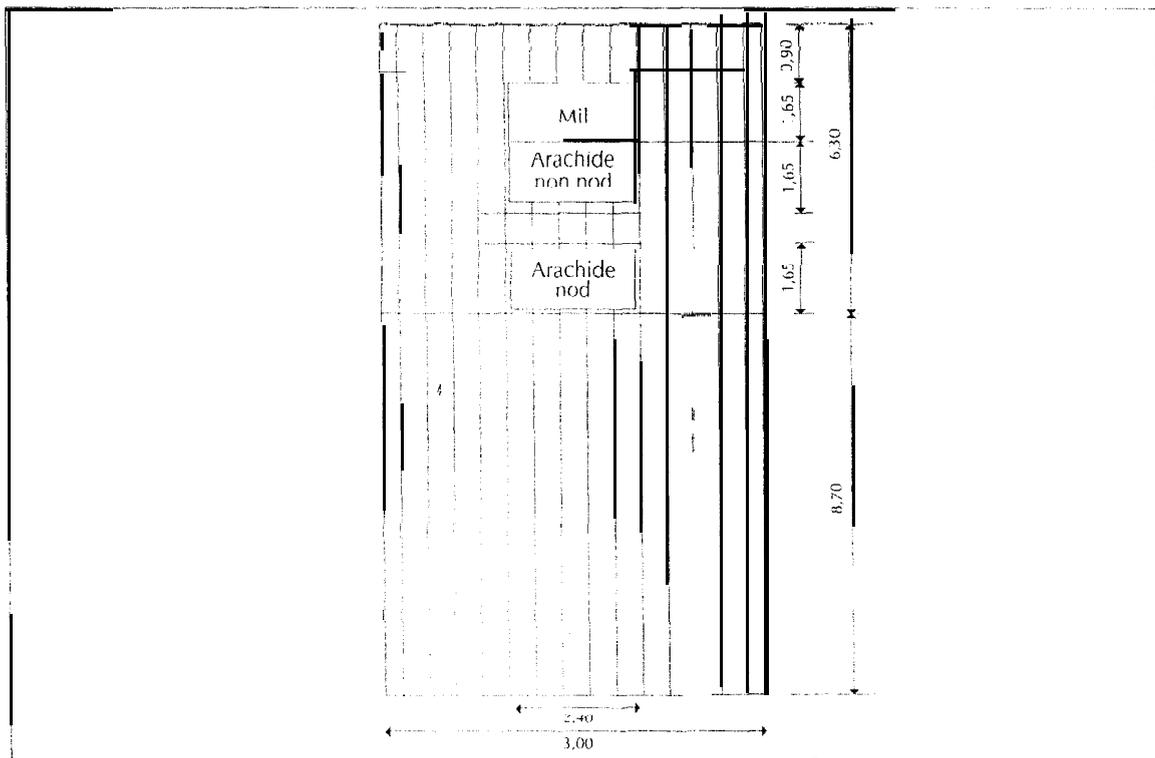
Le but du présent essai est de quantifier l'effet des amendements organiques (fumier) et calciques (chaux) dans la régénération de la fertilité azotée du sol en scindant la part de l'azote fixé et celle de N organique (dans le cas de la chaux, bien entendu, seule la fixation de l'azote est considérée).

MATERIEL ET METHODES

La zone étudiée est celle de l'isohète 500 mm caractérisée ces trente dernières années par- une forte régression pluviométrique. L'espérance de pluviométrie (probabilité d'atteindre ou de dépasser cette pluviométrie) est actuellement de 327 mm (cinq années sur dix).

Les sols sont principalement sableux, de types ferrugineux tropicaux, donc avec une nette prédominance de la kaolinite dans la fraction argileuse. Ils présentent de ce fait des qualités physiques médiocres: structure peu développée, très faible stabilité structurale et très mauvaise rétention hydrique (réserve en eau facilement

Figure 1 Plan des parcelles principales et sous-parcelles ¹⁵N



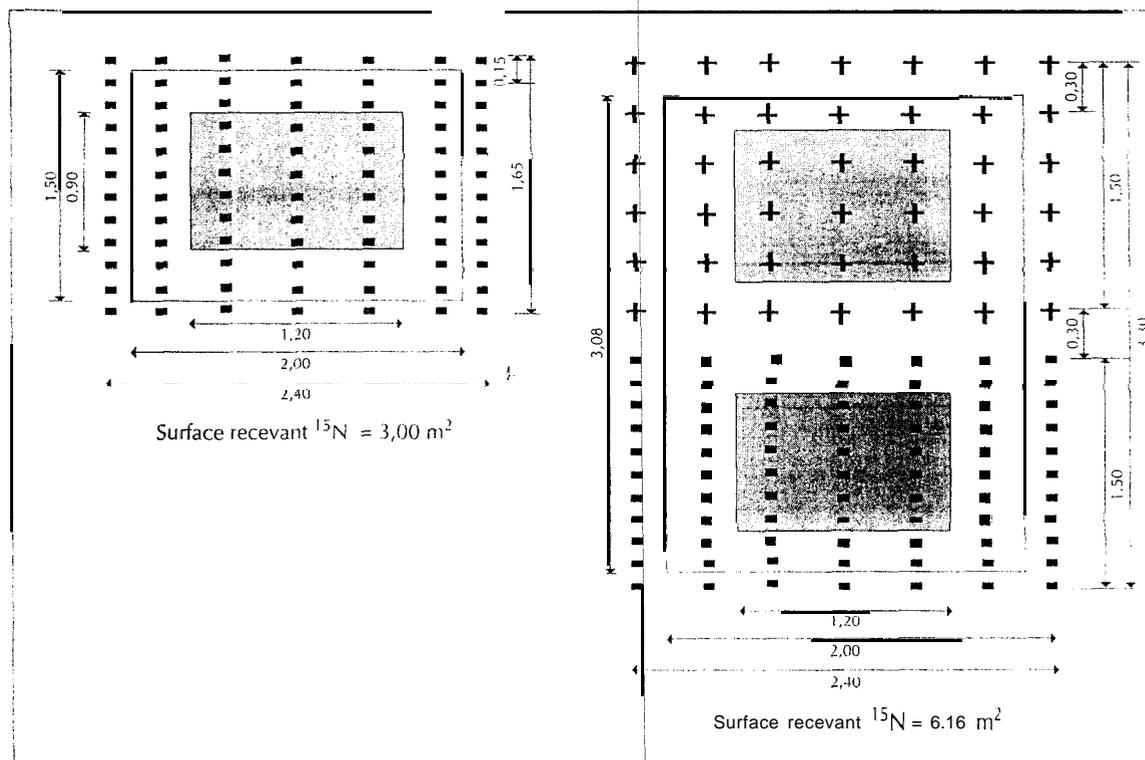
utilisable de 3 à 10%). Leur teneur en phosphore assimilable est très faible, inférieure à 10 ppm. Ces sols présentent cependant des potentialités agricoles assez élevées lorsqu'ils n'ont pas été dégradés par une surexploitation.

Le dispositif expérimental pluriannuel a déjà fait l'objet d'une description (Wey et Obaton, 1978; Cissé et Vachaud, 1987, 1988; Wey et al., 1987). Il a été mis en place par nous-mêmes en 1972. Il est de type blocs avec six répétitions. Le schéma parcellaire est représenté aux figures 1 et 2. Les différents traitements sont les suivants:

- arachide recevant la fumure minérale (f.m.);
- arachide recevant la chaux + f.m;
- arachide recevant le fumier + f.m.

Les mêmes traitements sont appliqués aux cultures de référence mil et arachide "non nod". Les traitements "chaulage" et "enfouissement" de fumier sont appliqués tous les deux ans sur la culture d'arachide, outre la fumure minérale vulgarisée appliquée annuellement à raison de 150 kg/ha d'engrais ternaire NPK de formule 8-18-27 pour l'arachide et de 1.50 kg/ha d'engrais ternaire NPK de formule 14-7-7 pour le mil. Le chaulage est réalisé à raison de 600 kg/ha/2 ans de Ca (OH), et l'apport de fumier est de 10 t/ha/2 ans si une humidité

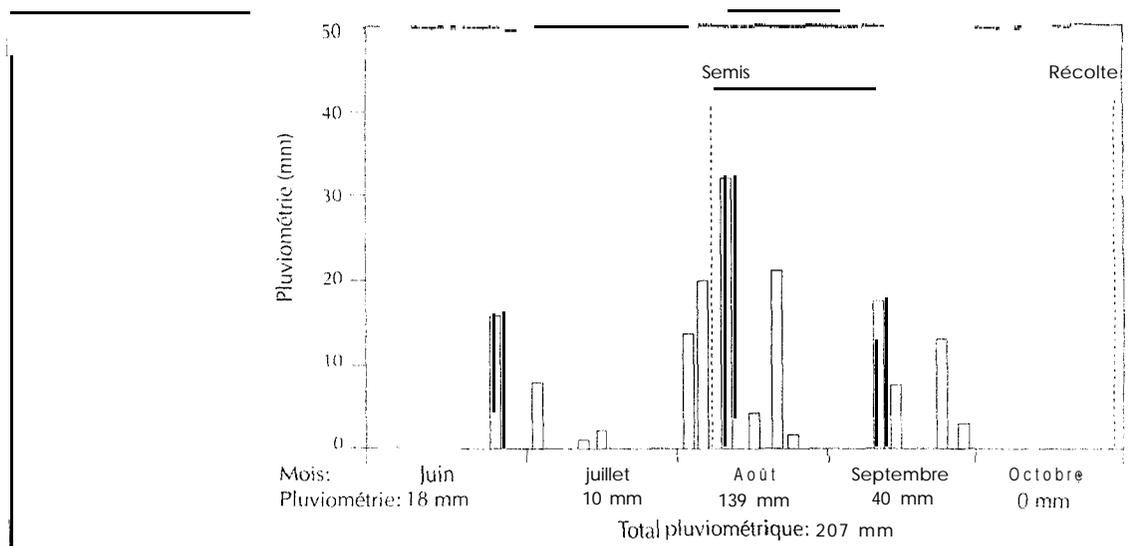
Figure 2 Plan des sous-parcelles ¹⁵N



comprise entre 50 et 60% du poids frais. L'apport ^{15}N est réalisé après huit années de fonctionnement du système de culture sous forme de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ marqué à 4,94% pour une dose de 14 kg N/ha sur l'arachide et à 0,78% pour une dose de 77 kg N/ha sur les cultures de référence (mil et arachide "non nod").

L'arachide non nodulante est fournie par l'Institut de recherche international sur les céréales en zone tropicale semi-aride (ICRISAT). Le cycle cultural est déterminé par rapport aux pluies à la figure 3. Le calcul de la fixation de l'azote est celui élaboré par l'Agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA). Il est fondé sur l'évaluation de la valeur A (Fried and Broeshart, 1975). A cet égard, rappelons les trois traitements appliqués: une arachide non nodulante est comparée à un mil au niveau de trois traitements: (a) témoin, (b) + chaux, (c) + fumier.

Figure 3 Pluviométrie de Thilmakha en 1983 et cycle végétatif de l'arachide



RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats préliminaires relatifs aux choix de la culture de référence

Les valeurs A obtenues (voir tableau 1) montrent des différences marquées entre le mil et l'arachide pour (a) et (b). Celles-ci sont cependant moins nettes pour (c). L'explication réside vraisemblablement dans la profondeur du front d'humectation: (1) supérieure à 2 m dans le cas des deux premiers traitements, ayant entraîné un enracinement plus profond pour le mil que pour l'arachide, (2) limitée à 80 cm pour le traitement "fumier"; l'enracinement du mil et de l'arachide aurait donc été contenu dans cet horizon (Cissé et Vachaud, 1988). L'arachide non nodulante est la plante de référence retenue. Les résultats relatifs à la part des trois sources de N (fixation de l'azote, sol et engrais) dans le N total de l'arachide sont présentés au tableau 2.

Tableau 1 Effet des amendements calcaïques et organiques sur la valeur A et sur N fourni par l'engrais et par le sol à deux plantes non fixatrices d'azote (mil variété 3/4 ex-bomu et arachide non nodulante)

Traitement	N total		Ndf				Ndfs		Valeur	
	Mil	Arachide non nod.	Mil	Arachide non nod.	Mil	Arachide non nod.	Mil	Arachide non nod.	Mil	Arachide non nod.
Témoin (a)	27,7 a ^d	22,3 a	44,8 a	65,5 a	12,4 a	14,6 a	15,3 a	7,7 a	95	40
+ chaux (b)	37,6 b	46,5 b	37,5 b	57,3 b	14,1 a	26,7 b	23,5 b	19,9 b	128	57
+ fumier (c)	53,5 c	56,7 b	30,8 b	33,0 c	16,5 a	18,7 a	37,0 c	38,0 c	172	156
cv (%)	20	21	27	12	29	28	28	23		

Note: a Les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement (Newman et Keuls).

Tableau 2 Sources de N (exprimées en pourcentage d'N total/plante ou en kg/ha) chez l'arachide, variété 55-437

Traitement	Ndf		NdfFix		Ndfs		N total kg N/ha
	%	kg N/ha	%	kg N/ha	%	kg N/ha	
Témoin	6,73 c ^d	1,09 a	66,7 a	10,8 a	26,6	4,3	16,2
+ chaux	3,57 b	1,69 b	81,6 c	36,7 b	14,6	6,6	45,0
+ fumier	2,13 a	1,82 b	74,0 b	63,1 c	23,9	20,4	85,4
cv (%)	21,9	19,2	8,8	20,7			17,8

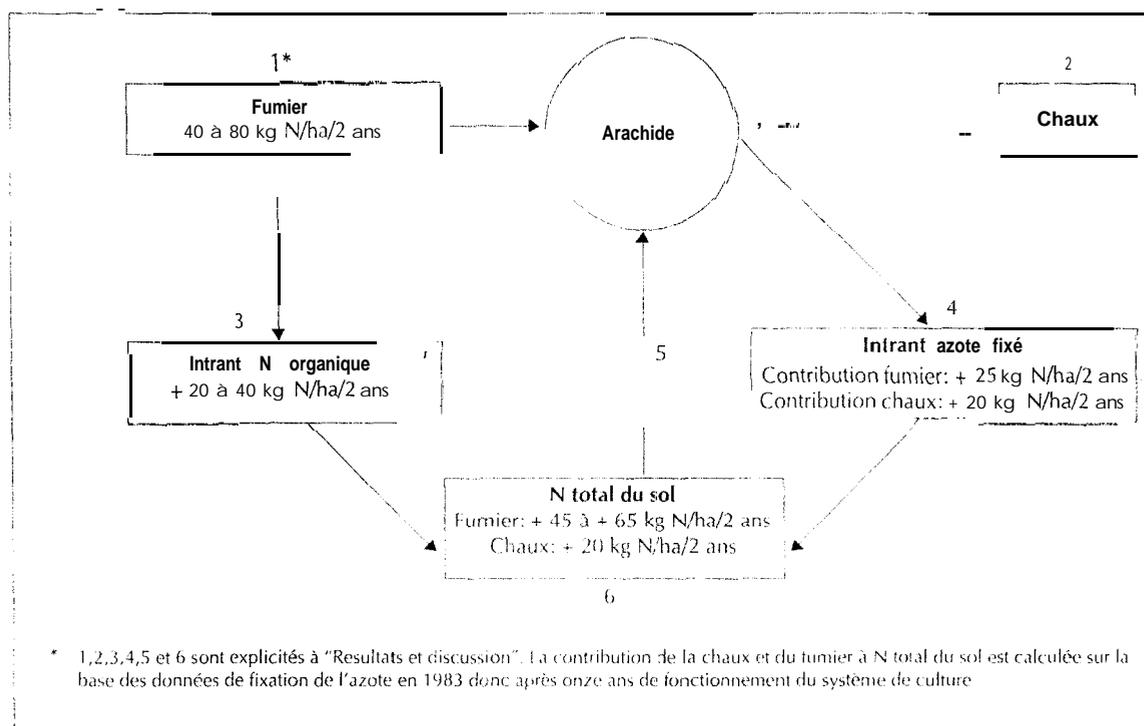
Note: a Les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement (Newman et Keuls).

En absence d'amendements, le pourcentage de N des parties aériennes et dérivé de la fixation de l'azote (NdfFix) est de 67%, donc relativement élevé eu égard à l'état de dégradation avancé du sol; en revanche, cette fixation est quantitativement très faible (11 kg N/ha). La faible capacité du sol à fournir N (NdfS: azote des parties aériennes de la plante dérivé de la matière organique du sol, native et exogène), d'environ 4 kg N/ha (l'arachide non nodulante a absorbé 22 kg N/ha dont 15 kg proviennent du sol et 7 kg de l'engrais azoté). explique ce plafonnement de N total à 16 kg N/ha. Le pourcentage de NdfFix reste donc relativement élevé malgré la faible capacité de fixation.

En présence du fumier, le pourcentage NdfFix s'accroît significativement, quoique faiblement: il passe de 67 à 74%; le NdfFix augmente également mais dans une proportion beaucoup plus large: il passe de 11 à 63 kg N/ha. Le NdfS est de 20 kg N-sol/ha pour l'arachide non nodulante (voir tableaux 1 et 2).

Les effets de l'amendement calcique vont dans le même sens que ceux de l'amendement organique (voir figure 4). La contribution de la chaux et du fumier à l'enrichissement de N total du sol est estimée comme suit: apport de fumier; apport de chaux; apport net de N provenant du fumier: apport de N provenant de la fixation de l'azote induite par les amendements; N-sol fourni par le sol à l'arachide; et N total du sol.

Figure 4 Contribution du fumier (10 t poids frais/ha/2 ans) et de la chaux (600 kg/ha/2 ans) à l'enrichissement du sol en N total. Les intrants "N organique" et "azote fixé" représentent les apports nets de N exogène au sol



Apport de fumier

Des doses d'apport identiques peuvent correspondre à des quantités de N très différentes, les principales causes de variation étant les pourcentages de matière sèche, de terre humifère et de N total. Rappelons que la dose appliquée est de 10 t/ha en poids frais tous les deux ans.

Apport de chaux

Application de 600 kg/ha tous les deux ans (chaux éteinte).

Apport net d'azote provenant du fumier

Le fumier subissant des pertes importantes dès son apport, variables selon l'époque et le mode d'application (Hamon, 1972; Ganry et Guiraud, 1979), nous préférons évaluer l'apport net de N "fumier" contribuant effectivement à l'enrichissement du sol. En revanche, en ce qui concerne l'apport net d'azote fixé calculé ci-dessous, cet apport au sol étant étalé dans le temps et réparti de façon assez homogène dans le sol, nous supposons que les risques de pertes sont très atténués par rapport au fumier.

L'apport de N "fumier" est calculé d'après Ganry et Guiraud (1979). Selon eux, pour une application de fumier de 10 t MS/ha sans engrais azoté, l'enrichissement de N total du sol, par rapport au témoin, atteint + 19% (+ 11% sans les résidus de fumier), soit environ + 100 kg N/ha/an dans le sol étudié (sol sableux "dior"). On retiendra donc le coefficient de transformation de 0,50, à savoir que 2 kg N/ha de fumier enrichissent N total du sol de 1 kg N/ha après un cycle cultural. Dans une autre expérience étudiant la décomposition de plusieurs matières végétales sur sol nu, sans engrais azoté, le coefficient est de 0,60 au bout d'un an (Ganry, 1977). Nous estimons donc qu'un apport bisannuel de fumier évalué en N total entre 40 et 80 kg N/ha procure, à Thilmakha, un enrichissement du sol compris entre 20 et 40 kg N/ha/2 ans.

Il apparaît alors intéressant de tester la validité de ce coefficient de transformation dans l'essai longue durée de Thilmakha. Deux données sont dès lors comparées:

Première donnée mesurée: ΔN_t = variation de N total du sol dans le temps par rapport à un témoin
Après six apports de fumier, la teneur en N sur 40 cm de sol atteint respectivement pour les traitements sans et avec fumier, 100 ppm (profil peu différencié) et 125 (130 ppm dans 0-20 cm et 120 ppm dans 20-40 cm) (Cissé, 1986; Wey et al., 1987), ce qui donne une augmentation d'environ 150 kg N/ha due au fumier au bout de onze ans (après six apports).

Seconde donnée calculée: ΔN_t = quantité de N total provenant du fumier au bout de t années
Nous considérons les valeurs suivantes:

- H = apport de N bisannuel par le fumier (cette quantité de N résulte d'une biodégradation sur un an du fumier apporté).
C = coefficient de pertes annuel moyen
n = nombre d'applications de fumier
t = nombre d'années: $t = 2n$
 ΔN_t = N total provenant du fumier au bout de t années

On prend comme hypothèse simplificatrice que chaque apport de fumier H est soumis à une dégradation exponentielle et tend vers une fraction humique H_{∞} ; au bout de n apports tous les deux ans sur t années, la quantité de N total obtenue à partir du fumier est de:

$$\Delta Nt = \sum_{i=0}^{i=n} (H - H_{\infty})e^{-ki} + H_{\infty}$$

si le fumier est appliqué en début de cycle de l'année t_0 , Nt est calculé au début du cycle de l'année $t_n = 2n$.

Dans l'essai en question, les valeurs sont les suivantes:

$H = 30$ kg N/ha/2 ans (moyenne admise ci-dessus)

$H_{\infty} = 5$ kg N/ha (valeur estimée)

date du premier apport du fumier: début de cycle cultural 1973

nombre d'apports = 5

$k = 0,18$. Il s'agit de la valeur d'un coefficient de pertes annuelles de N organique du sol, d'origine végétale, mesurée expérimentalement après un cycle pluviométrique (Ganry, 1977).

L'équation précédente $\Delta Nt = f(t)$ appliquée aux valeurs ci-dessus donne $\Delta Nt = 73$ kg N/ha en début de cycle de l'année 1983. En fin de cycle 1983, après le sixième apport de fumier réalisé en début de cycle, la valeur de ΔNt est la suivante:

$$\Delta Nt = 30 + 73 = 103 \text{ kg N/ha arrondi à } 100 \text{ kg N/ha}$$

Les valeurs de ces deux données ΔNt sont cohérentes, leur différence: $ISO - 100 = 50$ kg N/ha étant due à l'apport d'azote fixé, induit par le fumier.

Apport d'azote provenant de la fixation de l'azote induite par les amendements

Il s'agit de l'azote fixé recyclé dans le sol par la biomasse (défoliations et racines à la récolte) et la biomasse racinaire incorporée au sol en cours de cycle (exsudats + racines). Cette première biomasse a été évaluée par Charreau et Tourte (1967) (respectivement en systèmes traditionnels et améliorés) à 30 et 15% de N total/plante contenu dans les parties aériennes. La valeur exprimée en azote fixé correspond à 30 et 15% de N_{dfFix} (en admettant que les pourcentages de N_{dfFix} sont semblables). La seconde biomasse est très variable, l'exsudation étant fortement liée aux conditions écologiques; elle a été estimée dans deux expériences antérieures (a) en vases de végétation à 30% de N_{dfFix} (Ganry 1977), (b) en lysimètres 38% de N_{dfFix} (Ganry et Guiraud, non publié). Une valeur de 10 à 50% de N_{Fix} est généralement citée dans la littérature pour les légumineuses (Binet et Brunei, 1968; Dommergues et Mangenot, 1970), mais ces derniers auteurs reconnaissent la discrétion ou l'inexistence éventuelles de telles exsudations. Etant donné le manque de résultats expérimentaux, particulièrement en zone semi-aride, une très grande incertitude subsiste quant à cet apport de N . Nous estimerons par conséquent la part de l'azote fixé dans la biomasse racinaire à 30% de N_{dfFix} (23% d'azote fixé symbiotiquement dans le système sol-plante ou N_{Fix} dans le système sol-plante).

Dans l'essai de Thilmakha, afin d'estimer l'apport d'azote fixé recyclé dans le sol, nous devons considérer les trois systèmes étudiés: fumure minérale seule, fumure minérale + chaux et fumure minérale + fumier, le premier étant assimilé à un système traditionnel (régénération nulle), le deuxième à un système traditionnel en cours de régénération (régénération faible) et le troisième à un système en phase de régénération avancée assimilé à un système amélioré. Etant donné les trois gradients de régénération (nulle, faible et avancée) et compte tenu des résultats précédents, nous appliquons aux deux premiers systèmes, assimilés à des systèmes traditionnels, la valeur de 60% (30 + 30%) de N_{dfix} , et au système en phase de régénération avancée (assimilé à un système amélioré) la valeur de 45% (15 + 30%). Dans l'essai en question, après six amendements du sol (un amendement tous les deux ans), compte tenu des valeurs précédentes appliquées aux résultats du tableau 2 et compte tenu d'un coefficient de pertes évalué à 15% (Dommergues et Mangenot, 1970, admettent des pertes par dénitrification représentant 10 à 15% de la production annuelle et de l'apport d'azote nitrique), nous évaluerons les apports d'azote fixé moyens à 5, 19 et 24 kg N/ha/2 ans respectivement pour le sol, sans amendement, avec amendements calciques (chaux) et avec amendements organiques.

Azote sol fourni par le sol à l'arachide

Il est mesuré par application de la méthode de la valeur A que nous avons examinée ci-dessus.

Azote total du sol

L'augmentation de N total du sol estimée à 150 kg N/ha (*voir- ci-dessus*) est due aux apports de N exogène (intrants) provenant de trois sources et immobilisés dans le sol:

- (a) l'intrant "fumier", constant dans le temps, soit 30 kg N/ha/2 ans en moyenne;
- (b) l'intrant azote fixé, induit par le fumier, progressif dans le temps durant la phase de régénération, estime à 5.25 kg N/ha/2 ans;
- (c) l'intrant N-engrais estimé à 5 kg N/ha/2 ans (hypothèse d'une immobilisation de N-engrais de 15%); soit au total (a) + (b) + (c) = 60 kg N/ha/2 ans, soit 30 kg N/ha/an.

Si l'on suppose avoir atteint l'état d'équilibre organique, l'équation de Hénin et Dupuis (1945) peut être appliquée:

$$\frac{dN}{dt} = -K_2 N + H$$

soit:

$$H = 30 \text{ kg N/ha (système avec fumier)}$$

N au bout de 12 ans proche de N_{∞} (en supposant que le système est en fin de régénération)

profondeur de sol = 40 cm, pour une quantité de N total de:

$$N = 125 \text{ ppm} \times 6\,000 \text{ t terre/ha} = 750 \text{ kg N/ha}$$

l'équation ci-dessus devient:

$$30 = K_2 \times 750$$

$$\text{solution: } K_2 = 0,04$$

Siband (1972), cité par Charreau (1974), évalue également le coefficient de minéralisation nette de N à 0,04 dans un sol cultivé de Casamance (sud du Sénégal); Charreau (1967) mentionne, dans le cas d'un sol cultivé de Bambey, des valeurs comprises entre 0,026 et 0,065; Greenland (1980) cite une valeur moyenne de 0,04 pour l'Afrique de l'Ouest (variation 0,02 à 0,06).

On admet que N total du sol est constitué du pool N mobilisable qui participe au cycle interne de N et d'un pool constitué de N humique biologiquement stable (Dommergues et Mangenot, 1970). Dans l'essai, N total est de 600 kg N/ha dans l'horizon 0-40 cm pour les traitements "témoin et chaulage", et de 7.50 kg N/ha pour le traitement "fumier". Pour ces mêmes traitements, le pool de N mobilisable représenté par la valeur A obtenue avec le mil (voir tableau 1) est respectivement de 95, 128 et 172 kg N/ha équivalent sulfate.

On pourrait être tenté d'estimer, par différence, un pool de N humique stable qui serait de $a = 505$, $b = 472$ et $c = 578$ kg N/ha respectivement pour les mêmes traitements (a) témoin, (b) chaulage et (c) fumier. Cependant, on ne retiendra que les comparaisons entre ces estimations, et non leur valeur numérique. Elles résultent en effet de la différence de deux grandeurs dont l'une est exprimée en équivalent engrais (valeur A), et l'autre liée à une profondeur (N total du sol), celle de l'horizon contenant au moins 80 % du système racinaire (profondeur estimée à 40 cm).

On suppose dès lors que l'inéquation des valeurs A, obtenue expérimentalement, se vérifie quelle que soit la nature de l'engrais azoté utilisé pour cette estimation:

$$\begin{array}{ccc} \text{Valeur A "témoin"} < \text{Valeur A "chaux"} < \text{Valeur A "fumier"} & & (1) \\ (\text{At}) & & (\text{Ac}) & & (\text{Af}) \end{array}$$

Par ailleurs, les données de l'analyse du sol nous permettent d'établir la relation expérimentale:

$$\begin{array}{ccc} \text{N total sol "témoin"} = \text{N total sol "chaux"} < \text{N total sol "fumier"} & & (2) \\ (\text{Nt}) & & (\text{Nc}) & & (\text{Nf}) \end{array}$$

$$\text{Si la relation } \text{Af} - \text{Ac} < \text{Nf} - \text{Nc} \text{ est satisfaite, on en déduit:} \quad (3)$$

$$\begin{array}{ccc} \text{N humique stable} \leq \text{N humique stable} < \text{N humique stable} & & (4) \\ \text{"chaux"} (\text{Ic}) & & \text{"témoin"} (\text{It}) & & \text{"fumier"} (\text{If}) \end{array}$$

Sur la base des évaluations de N total-sol obtenues à l'état d'équilibre organique, la relation (3) s'exprime de la façon suivante:

$$\text{Valeur A "fumier"} - \text{Valeur A "chaux"} < 150 \text{ kg N/ha}$$

Expérimentalement, nous avons toujours vérifié cette inéquation. Les comparaisons permises par l'inéquation (1) suggèrent que la fixation de l'azote (NFix) due à la chaux n'alimenterait que le cycle interne de N et non N humique stable qui a même tendance à diminuer; seul le fumier alimente ce dernier et peut contribuer ainsi à améliorer durablement la fertilité azotée du sol.

Ces résultats sont conformes à ceux de Wey et al. (1987): la chaux induit une diminution de N non hydrolysable (N considéré comme très stable) et le fumier accroît nettement N hydrolysable non distillable (N protéique considéré comme mobilisable).

CONCLUSION

Malgré une faible pluviosité, la capacité fixatrice de l'arachide est nettement accrue par l'amendement organique (fumier) et, dans une moindre mesure, par l'amendement calcique. La contribution de la fixation de l'azote à l'enrichissement de N total du sol induite par le fumier est supérieure à celle de la chaux (25 vs. 20 kg N/ha/2ans). Ces amendements accroissent le pool de N mobilisable du sol (valeur A) avec, cependant, une nette supériorité du fumier: seul ce dernier enrichit le pool de N humique biologiquement stable. On comprend dès lors que la chaux soit apte à maintenir la productivité d'un sol dégradé en culture continue, avec cependant une tendance à la baisse de la teneur en matière organique perceptible à long terme (Nicou et Chopart, 1989, non publié). Elle est cependant insuffisante pour régénérer un sol dégradé, malgré son effet favorable sur la fixation de l'azote. Un apport exogène de matière organique préhumifiée est nécessaire.

Actuellement, le phénomène de jaunissement a totalement disparu sur les parcelles amendées par la chaux et/ou le fumier, alors qu'il s'est propagé largement sur les autres parcelles (Wey et al., 1987). Cet effet favorable de la chaux, dont nous venons d'appréhender les limites, a déjà été démontré, il y a une cinquantaine d'années, par Sagot (1934) qui procédait à la constatation suivante: "il est particulièrement à retenir: (a) que les amendements calcaires permettent à l'arachide de disposer des apports d'engrais mis à sa disposition: que la chaux donne à l'arachide une résistance remarquable à la sécheresse, (b) que la chaux donne sur le mil et l'arachide des plus-values notables de rendement et permet à l'arachide une maturation plus parfaite de ses fruits."

Bibliographie

- Binet, P. et Brunel, J-P. 1968. *Physiologie végétale II*. Collection 'Biologie' A. OBRE. Paris (France): DOIN.
- Blondel, D. 1970. Relation entre le 'nanisme jaune' de l'arachide en sol sableux (dior) et le pH. Définition d'un seuil de l'activité du *Rhizobium*. *Agron. Trop* 25: 589-95.
- Bouhot, P.S. 1968. Le rabougrissement de l'arachide. *Agron. Trop*, 23: 1226-27.
- Bouffil, F. 1956. Possibilités d'évolution rapide de l'agriculture africaine. In *Le Centre de recherches agronomiques de Bambey au service de la production, Gouvernement Général de l'Afrique Occidentale française, Inspection générale de l'agriculture*. Bambey (Sénégal).
- Charreau, C. 1974. *Soils of Tropical Dry and Dry-Wet Climatic Areas of West Africa and Their Use and Management*. Agronomy Mimeograph 74-26, New York (Etats-Unis): Department of Agronomy, Cornell University.
- Charreau, C. et Tourte, R. 1967. Le rôle des facteurs biologiques dans l'amélioration du profil cultural dans les systèmes d'agriculture traditionnelle de zone tropicale sèche. In *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux*. Tananarive (Madagascar): IRAT.
- Chopart, J.L. et Nicou, R. 1989. Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. *Agron. Trop*, 44: 2681.
- Cissé, I. 1986. Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du centre-nord du Sénégal. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Nancy (France): Institut national polytechnique de Lorraine.
- Cissé, I. et Vachaud, G. 1987. Une méthode simplifiée d'estimation *in situ* de l'extraction de l'eau par les racines. *Agron. Trop*, 42: 241-17.
- Cissé, I. et Vachaud, G. 1988. Influence d'apports de matière organique sur la culture du mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord-Sénégal. I. Bilan de consommation, production et développement racinaire. *Revue Agronomie* B: 315-26.

- Dommergues, Y. et Mangenot, F. 1970. *Ecologie microbienne du Sol*. Paris (France): Masson.
- Fried, M. et Broeschart, H. 1975. An independent measurement of the amount of nitrogen fixed by a legume crop. *Plant and Soil* 43: 707-11.
- Ganry, F. 1977. Etude en microlysismètres de la décomposition de plusieurs types de résidus de récolte dans un sol sableux tropical. *Agron. Trop.* 32: 51-65.
- Ganry, F. et Guiraud, G. 1979. Mode d'application du fumier et bilan azoté dans un système mil-sol sableux au Sénégal. Etude au moyen de ^{15}N . In *Isotopes and Radiation in Research on Soil-Plant Relationship*. Vienne (Autriche): AIEA.
- Greenland, D.J. 1980. The nitrogen cycle in West Africa. Agronomic considerations. In Rosswall, T. (ed) *Nitrogen Cycling in West Africa Ecosystem*. Ibadan (Nigeria): IITA.
- Hamon, R. 1972. L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche (Bilan de 3 années d'études). *Agron. Trop.* 27: 592-607.
- Hénin, S. et Dupuis, M. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.* 1: 16-27.
- Pichot, J., Sedogo, M.P., Poulain, F. et Arrivets, J. 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence des fumures minérales et organiques. *Agron. Trop.* 36: 122-33.
- Pieri, C. 1976. I. L'acidification d'un sol dior cultivé au Sénégal et ses conséquences agronomiques. II. L'acidification des terres cultivées exondées au Sénégal. *Agron. Trop.* 31: 339-68.
- Sagot, R. 1934. Etude sur la régénération des sols et sur l'influence des engrais et des amendements calcaires sur le mil et l'arachide. Rapports techniques de 1932 à 1945 de la Station expérimentale de l'arachide de Bamby (Sénégal).
- Wey, J. et Obaton, M. 1978. Incidence de quelques techniques culturales sur l'activité fixatrice d'azote et le rendement de l'arachide. *Agron. Trop.* 33: 129-36.
- Wey, J., Siband, P., Oliver, R., Egoumenides, C. et Ganry, F. 1987. Essai de régénération d'un sol de la zone arachidière du centre-nord du Sénégal. *Agron. Trop.* 42: 258-68.