

Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche

Francis Ganry

▶ **To cite this version:**

Francis Ganry. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Sciences de la Terre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 1990. Français. NNT : 1990NAN10027 . tel-01747177

HAL Id: tel-01747177
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747177

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Sc N 90/27 B

THESE

DE DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES NATURELLES

PRESENTEE

A L'UNIVERSITE DE NANCY I

UNIVERSITE * NANCY * BIBLIOTHEQUE SCIENCES

par

Francis GANRY

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR ES SCIENCES

APPLICATION DE LA METHODE ISOTOPIQUE A L'ETUDE DES BILANS AZOTES EN ZONE TROPICALE SECHE

Soutenue le 8 janvier 1990 devant le jury composé de :

MM.	A. HERBILLON	Président
	Y. DOMMERGUES	Rapporteurs
	G. GUIRAUD	
	F. JACQUIN	Examinateurs
	C. PIERI	
	G. PIZELLE	
	L. SARR	
	P. SIBAND	

"Nulle question n'est plus intéressante en agriculture que celle de l'origine de l'azote des végétaux".

Marcelin BERTHELOT (1898)

"Pour qui parcourt ce grand Territoire, en saison sèche et sous le souffle de l'Harmattan, le seul réconfort est la pensée, qu'avec les pluies, des centaines de milliers d'hectares désolés en ce moment, se recouvriront à nouveau comme chaque année d'un immense tapis vert, constellé de fleurs couleur d'or qui enfouiront discrètement sous les sables arides, la vie de demain".

P. LUCAS (1956)

AVANT – PROPOS

UNIVERSITE * NANCY * BIBLIOTHEQUE-SCIENCES

Le présent travail a été réalisé au Centre de Recherches Agronomiques de Bambey (C.N.R.A) au Sénégal de 1972 à 1985.

Avant toute présentation de ce travail, nous voudrions en évoquer la genèse et montrer comment il s'inscrit dans une série d'études faisant une large part à l'**approche systèmique**, de l'écologie microbienne des sols au système agraire, afin d'en tirer des **"lois de comportement"**, fondement nécessaire de toute **optimisation ou intensification rationnelle**.

Sous l'impulsion de Y. DOMMERGUES, la biologie des sols s'élargit au système sol-plante donnant naissance à l'écologie microbienne des sols (DOMMERGUES et MANGENOT 1970). Cette nouvelle approche systémique apporte en ce qui concerne la zone tropicale sèche, un véritable bouleversement dans l'exploitation agricole des sols sableux, du moins leur possibilité d'exploitation, sols sableux pourtant réputés biologiquement peu actifs dont "la vie microbienne présente une activité réduite" (BOUYER 1951). A la classique notion de "quantité" de micro-organismes sur laquelle se fondait S. BOUYER, Y. DOMMERGUES ajoute la notion d'"activité" microbienne. Prolongeant les travaux de DROUINEAU (1953) et de BIRCH (1958), il met en évidence, et dans son sillage au Sénégal D. BLONDEL et G. JUNG, en particulier, deux processus capitaux. Le premier concerne l'**"explosion" biologique**, intense mais éphémère, qui suit la première pluie, avec ses conséquences pour la plante : favorables (nutrition minérale et azotée, enracinement) et défavorables (dénitrification et lixiviation) ; le second processus est **l'effet rhizosphérique**, prenant en quelque sorte le relais du premier.

Plusieurs pratiques culturales dont le bien-fondé s'était certes déjà vérifié dans leurs conséquences agricoles, ont été validées par la suite, par la mise en évidence du "pic de minéralisation" ou "flush d'azote minéral", effet de cette "explosion" biologique, et par la mise en évidence de la minéralisation rhizosphérique.

Parallèlement à cette évolution de la biologie des sols, sous l'impulsion de R. TOURTE, la recherche agronomique relative à l'amélioration de la productivité des sols tropicaux se modifie considérablement dans le temps est dans l'espace (TOURTE 1965, TOURTE *et al.* 1971, TOURTE et BILLAZ 1982).

On voit alors apparaître au Sénégal une première génération d'essais de longue durée comprenant les essais dits "amélioration foncières" et les essais "systèmes de culture".

L'essai de longue durée en plus de son rôle de démonstration permanente *in situ*, et en plus de son rôle de référentiel technique (se valorisant au fil des ans et apportant des données généralement fiables pour un itinéraire technique donné dans un environnement donné), peut être considéré au bout d'un certain temps comme un sytème de culture, proche de son niveau d'équilibre, ayant engendré un agrosystème. Cet essai constitue alors un milieu potentiellement riche d'enseignements. C'est ainsi que furent analysés les effets cumulatifs des précédents culturaux et des pratiques culturales (NICOU 1978, SARR 1981, WEY *et al.* 1987, CHOPART et NICOU 1987, CORTIER *et al.* 1988 et PIERI 1989).

L'essai de longue durée est la pièce maîtresse de notre dispositif expérimental *in situ* ayant permis les recherches ci-aprés développées.

De plus en plus s'est imposé la nécessité d'étudier la plante, non plus de façon isolée, mais comme élément d'un système, avec les autres plantes qui l'accompagnent dans le temps (culture en rotation et parfois culture dérobée) ou dans l'espace (cultures associées).

Ce principe a guidé nos recherches sur l'économie de l'azote en culture céréalière.

Dans l'espace, toujours à l'instigation de R. TOURTE, on a voulu dépasser l'échelle de la parcelle, pour s'intéresser au bassin versant et au système agraire que nous évoquons au chapitre II. Les Unités Expérimentales furent alors créées. **Cette approche systémique du milieu rural à plusieurs échelles commandera par la suite de toujours bien préciser à quel niveau se situe l'évaluation du système** comme nous le rappelle PIERI dans son étude sur les bilans minéraux (PIERI 1985).

Ainsi naquit la "démarche système" intégrant ces deux processus qui s'inscrivent dans le temps et dans l'espace; **notre démarche scientifique y est conforme** (voir introduction générale ci-aprés).

C'est sous l'impulsion dynamique de ces deux écoles que l'IRAT* se met en devoir de résoudre la contradiction apparente d'un accroissement de la production céréalière dans une situation de recession des engrais azotés, suite à une augmentation des prix due à la crise pétrolière de 1973 ; récession aggravée par les conséquences économiques désastreuses de la sécheresse. L'IRAT, afin de permettre la réalisation de tels programmes dans des structures étrangères, met en place à ce moment-là, avec l'accord du Sénégal, ses programmes, dits "article 8", toujours en vigueur, sans lesquels ces recherches n'auraient pu aboutir. Ainsi, avons-nous mis en oeuvre en 1974 un programme à long terme sur l'économie des engrais azotés et le maintien de la fertilité azotée des sols qui vient de donner naissance au présent mémoire dont les travaux se sont échelonnés sur quatorze années. Il nous fallait obtenir des résultats

convaincants ayant un impact agronomique susceptible d'être évalué économiquement et surtout applicables en milieu réel. L'azote étant l'élément étudié, il était donc nécessaire de quantifier les principaux processus relatifs aux inputs d'azote dans le système de culture, c'est-à-dire l'apport d'engrais azoté et la fixation symbiotique de N_2. Dans cette démarche :

- nous nous sommes tournés vers le C.E.N de Cadarache* avec lequel naquit une collaboration incessante et fructueuse (G. GUIRAUD) ;

- nos requêtes ont toujours reçu un écho favorable de la part de l'AIEA* qui a approuvé nos travaux et reconduit plusieurs programmes coordonnés quadriennaux assortis d'une aide matérielle considérable ;

- nous avons suscité la création du laboratoire de rhizobiologie appliquée du CNRA de Bambey, complémentaire à celui de l'ORSTOM* de Dakar à orientation plus fondamentale, et avons pu réaliser nos premières mesures de fixation de N_2 sur légumineuses *in situ* par la méthode dite à l'"acétylène" et par la méthode isotopique (à Séfa en 1973). Pour la première méthode, c'est grâce aux techniques mises au point au C.P.B de Nancy* puis à l'ORSTOM de Dakar (Y. DOMMERGUES, J. BALANDREAU et G. RINAUDO) ; pour la seconde méthode, c'est grâce à l'appui financier et méthodologique de l'AIEA* ;

- plus récemment nous avons entrepris une collaboration avec l'IFDC*, dont une station est basée à Lomé (Togo) pour ses travaux sur le continent africain.

Pour l'étude des thèmes plus fondamentaux tels que phytotoxicité et allélopathie, fixation de N_2, matière organique du sol, nous avons dû collaborer avec d'autres Centres de recherche (C.P.B de Nancy, ORSTOM de Dakar, C.R.A de BRAUNSHWEIG en République Fédérale Allemande*).

---

* C.P.B : Centre de Pédologie Biologique du CNRS de Nancy (France)
A.I.E.A : Agence Internationale de l'Energie Atomique de Vienne (Autriche)
C.E.N : Centre d'Etude Nucléaire de Cadarache (France)
C.R.A : Centre de Recherches Agronomique de Braunschweig (République Fédérale Allemande)
I.F.D.C : Centre International pour le Développement de l'Engrais Alabama (U.S.A)
I.R.A.T : Institut de Recherches en Agronomie Tropicale, Département du CIRAD : Centre de Coopération Internationale de Recherches Agronomiques et de Développement (France)
O.R.S.T.O.M : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, à des degrés divers, à différentes étapes de l'évolution de ce travail, m'ont accordé leur temps et fait bénéficier de leurs conseils.

C'est d'abord à Mr. Y. DOMMERGUES à qui je dois mon entrée à l'IRAT ainsi que l'initiative et la direction scientifique de cette thèse, que j'exprime toute ma reconnaissance.

J'exprime mes plus vifs remerciements :

au Pr. F. JACQUIN et au Pr. DUCHAUFOUR, mes professeurs d'agrologie et de pédologie, qui sont à la base de ma formation en science du sol ;

au Pr. A. HERBILLON, Directeur du CPB de Nancy pour avoir accepté de présider ce jury et pour l'attention bienveillance qu'il a portée à la réalisation de cette thèse.

au Pr. G. PIZELLE, Maître de Conférence à l'université de Nancy I qui m'a fait l'honneur de juger cette thèse.

Je remercie la Direction Générale de l'ISRA, en particulier Mr. P.L. SARR, Directeur de recherche sur les Systèmes Agraires et l'Economie Agricole et Mr. M. SONKO, Chef du Centre de Recherches Agronomiques de Bambey, pour l'appui inestimable et la confiance qu'ils m'ont accordés.

Je remercie le Directeur Général du CIRAD, et plus particulièrement Mr. CHARREAU, Directeur de l'IRAT, pour l'intérêt qu'il a toujours manifesté à mon travail.

Mes remerciements vont également à Mr. TOURTE qui dans ses fonctions successives à la direction de l'IRAT, au Sénégal puis en France, m'a toujours encouragé dans mes travaux en favorisant notamment les recherches de base qui ont permis l'introduction des techniques isotopiques et microbiologiques au CNRA de Bambey.

Il m'est agréable de remercier le Dr. Paul VLEK de l'IFDC, le Dr. Y. BARRADA de l'AIEA maintenant à l'Université du Caire, et le Dr. S. DANSO de l'AIEA auxquels je dois la réalisation d'une partie importante de mon programme sur les céréales et les légumineuses. Il m'est agréable de remercier également le Pr. H. SOCHTIG avec lequel j'ai eu des échanges scientifiques extrêmement féconds et qui m'a permis notamment de résoudre l'enigme des pertes d'azote engrais en sol acide.

Que tous mes collègues qui m'ont aidé et guidé trouvent ici l'expression de mon amitié :

G. GUIRAUD du CEN de Cadarache qui m'a initié aux techniques isotopiques à Cadarache et à Bambey, et m'a apporté l'appui indispensable dans le choix des méthodes et la réalisation de nombreuses analyses isotopiques. Ses exigences analytiques m'ont conduit à observer davantage de rigueur lors de la préparation des distillats azote 15 et à vérifier sans cesse les résultats obtenus. Notre collaboration ne s'est jamais démentie et dure toujours ;

Ch. PIERI de l'IRAT qui m'a accordé sa confiance, soutenu dans des moments difficiles et m'a fait l'honneur de juger cette thèse ; il m'a permis l'approche de l'univers des modèles, des cycles et des bilans et m'a fait découvrir des horizons nouveaux ;

P. SIBAND de l'IRAT qui a toujours trouvé le temps de me recevoir et m'a apporté la lumière sur de nombreux problèmes. Je lui dois de nombreuses idées recueillies lors de fructueuses discussions et suis heureux d'avoir bénéficié de son esprit critique ;

J. WEY de l'IRAT, mon plus proche et infatigable collaborateur, agrorhizobiologiste de profession mais paysan dans l'âme, dont le travail accompli dans le programme légumineuse a été trés efficace ; son sens agronomique a grandement contribué à la réussite de nos cultures ;

R. OLIVER de l'IRAT, des doigts de chimiste mais un regard d'agronome qui m'a toujours apporté l'appui indispensable de son laboratoire et utilement conseillé dans mes analyses eau-sol-plante ;

J. PICHOT, Directeur scientifique du DSA/CIRAD, qui a toujours montré une grande disponibilité pour me recevoir, m'écouter et me "semoncer" à l'occasion, mais

toujours dans un esprit constructif avec notamment un appui bibliographique incessant ;

R. NICOU de l'IRAT, alors Chef du Groupe Amélioration du Milieu au CNRA de Bambey qui encouragea la recherche de base au Sénégal et me conseilla judicieusement dans mes débuts sur le terrain tout en déplorant "ma dispersion".

La bonne réputation de notre laboratoire de biochimie des sols du CNRA de Bambey doit beaucoup à la compétence et au dynamisme de Madame Fatou GUEYE, mon assistante. Grâce à sa solide expérience en techniques et technologie isotopiques (école de Cadarache), son action a été déterminante dans la mise en place et le suivi des essais azote 15, ainsi que dans la gestion de l'épais dossier analytique. Je lui dois la réalisation technique des nombreuses analyses chimiques aidée en cela par une équipe dont elle assure la supervision avec toujours bonne humeur. Je tiens à la remercier tout particulièrement.

J'associe à mes remerciements Mme Aminata BADIANE de l'ISRA qui m'a grandement déchargé de mes tâches de chef de service durant la période rédactionnelle de ce mémoire, Mr. Limamoulaye CISSE de l'ISRA pour ces précieux conseils scientifiques, Mr. H.G. DIEM microbiologiste à l'ORSTOM de Dakar : ensemble nous avons montré l'impact agronomique (sur le soja) des champignons mycorhiziens, MM. J. LARCHER et G. POCTHIER représentants de l'IRAT au Sénégal mais aussi agronomes tournés vers l'application, lesquels m'ont fait profiter de leur expérience de terrain.

Que soit remercié aussi trés chaleureusement tout le personnel du laboratoire de biochimie des sols du CNRA, notamment Mr. Samba CISSE, technicien supérieur et MM. Saliou FAYE, Omar TOURE et Ibrahima SANE techniciens, pour leur travail sur le terrain et au laboratoire, ainsi que le dactylographe Isidore NDIONE.

Je n'aurai garde d'oublier Mme Claude GANRY, mon épouse, qui s'est chargé de la saisie informatique et de la mise en page du mémoire, Madame Elisabeth ROLLAND et Mr. Ch. GOUNEL pour leur précieuse collaboration à la réalisation technique du document.

Je ne saurais oublier mes amis et ma famille qui par leur patience m'ont aidé et n'ont jamais cessé de participer dans l'ombre à ce travail.

Enfin, je dédie ce mémoire à Mr. Youssouph NDIAYE, technicien de l'ISRA dont la compétence, l'abnégation, la disponibilité et l'esprit critique ont été essentiels dans l'acquisition de mes résultats.

ABREVIATIONS UTILISEES

1 - Engrais azoté

F = Désigne l'engrais azoté.

CAU = Accroissement de l'azote total des parties aériennes de la plante pour 100 kg d'azote engrais apporté, appelé coefficient apparent d'utilisation de l'azote engrais.

CRU = Pourcentage de l'azote engrais apporté, absorbé par les parties aériennes de la plante, appelé coefficient réel d'utilisation de l'azote engrais.

NiS = Azote engrais immobilisé dans le sol et les racines de l'ensemble du profil prospecté par les racines (mesuré directement).

NiSP = Azote engrais immobilisé dans le sol et les racines entrant dans le cycle interne de l'azote et de ce fait pouvant contribuer au maintien de la fertilité azotée du sol (estimé indirectement).

Nis = Azote engrais immobilisé dans le sol et les racines de l'horizon de surface à forte densité racinaire (au moins 80% du système racinaire) ; de ce fait facilement récupérable par les cultures suivantes (mesuré directement dans l'horizon considéré). Cet horizon est parfois appelé horizon agronomique.

2 - Plante

Ns = Azote prélevé par la plante au sol incluant l'engrais.

Nsem = Azote des semences prélevé par la plante qu'on admettra égal à l'azote apporté par les semences.

NdfS = Azote des parties aériennes de la plante dérivé de la matière organique du sol, native et exogène.

NdfF = Azote des parties aériennes de la plante dérivé de l'engrais.

NdfFix = Azote des parties aériennes dérivé de la fixation de N_2.

N total = **NdfS** + **NdfF** + **NdfFix** = Azote total des parties aériennes de la plante. Dans notre texte, le terme N total concerne exclusivement N total de la plante. Lorsque l'on parle de l'azote total du sol, il est toujours précisé en toute lettre "azote total du sol".

3 - Bilan azoté

Inputs = Entrées d'azote dans le système de culture.

NF = Azote engrais apporté à la culture.

Nr = Azote restitué par la plante au sol incluant la biomasse racinaire.

Nc = Azote du compost ou du fumier (résidus de récolte composté avec ou sans les animaux).

NFix = Quantité de N_2 fixée symbiotiquement dans le système sol-plante.

Nfix = Quantité de N_2 fixée asymbiotiquement dans le système sol-plante.

Outputs = Sorties d'azote hors du système de culture.

Nex = Azote exporté par les récoltes.

Nl = Azote perdu par lixiviation, érosion et ruissellement.

Nv = Azote perdu par volatilisation et dénitrification.

$\triangle$N = Somme algébrique des inputs et des outputs au niveau du système de culture.

4 - Climat

ETR = Evapotranspiration réelle.

ETM = Evapotranspiration maximum.

G L O S S A I R E

1 - Agrosystème

L'agrosystème correspond à la destruction des équilibres naturels et à leur remplacement par des équilibres secondaires. Dans cette étude, l'agrosystème est un système de culture (voir glossaire) ayant atteint - ou proche de - son niveau d'équilibre (voir glossaire).

2 - Azote mobilisable

Azote du sol ("available amount of soil nitrogen nutrient") dans lequel s'alimente la plante, conventionnellement représentée par la valeur A (voir glossaire).

3 - Coefficient apparent d'utilisation de l'azote engrais (HEBERT 1971)

Ce coefficient est une estimation de l'effet de l'engrais sur l'accroissement de N total dans les parties aériennes de la plante.

$$CAU\ \% = \frac{N\ total\ (+F) - N\ total\ (-F)}{NF} \times 100$$

4 - Coefficient réel d'utilisation de l'azote

A l'instar du précédent, ce coefficient représente le pourcentage de l'azote engrais absorbé dans les parties aériennes de la plante.

$$CRU\ \% = \frac{N\ total \times NdfF\ \%}{NF}$$

5 - Dose maximum (ou maximale) d'azote engrais

Désigne la dose d'azote engrais permettant d'atteindre le rendement maximum ; se calcule en annulant la dérivée de la fonction production y = f (x), à savoir y' = 0.

6 - Dose optimum (ou optimale) d'azote engrais

Encore appelé optimum économique, désigne la dose d'azote permettant d'obtenir le profit maximum dans un contexte économique donné, caractérisé par le rapport :

$$k = \frac{\text{coût urée}}{\text{prix céréale}}$$

se calcule à partir de la relation y' = k.

7 - Effectivité symbiotique (JARA 1981)

Aptitude d'une souche à fixer N_2 dans le nodule. Il existe divers degrés dans l'effectivité: une souche de rhizobium peut être ineffective, peu effective, effective ou trés effective.

8 - Efficacité symbiotique ou perfomance symbiotique (JARA 1981)

Ensemble des principaux caractères du système fixateur symbiotique, à savoir l'aptitude à noduler et l'aptitude à fixer N_2.

9 - Efficience réelle de l'azote engrais

C'est la somme des pourcentages de l'azote engrais absorbé dans les parties aériennes de la plante et de l'azote engrais immobilisé dans le sol et les racines potentiellement récupérable par la plante : efficience réelle = CRU % + NiSP %. Cette valeur ne peut être mesurée directement. Nous faisons l'hypothèse qu'elle est comprise entre les deux estimations suivantes:

. estimation approchée par excès = CRU % + NiS %

. estimation approchée par défaut = CRU % + Nis %.

10 - Efficience relative de l'azote engrais (AIEA 1983)

Cette efficience est fondée sur le critère de la valeur A dont elle est l'inverse ; l'efficience est dite relative lorqu'elle est exprimée par rapport à une efficience de référence.

Exemple concernant deux méthodes d'apport de l'urée sur maïs :

(a) la méthode de placement "en surface" donne une valeur A de 98 kg N ha^{-1} équivalent urée ; l'efficience est alors égale à 1/98 ;

(b) la méthode de placement de l'urée en "localisé" donne une valeur A de 57 kg N ha^{-1} équivalent urée, donc une efficience égale à 1/57 ;

prenant la méthode (b) comme référence, l'efficience relative de la méthode (a) est de: 57/98 = 0,58.

11 - Fixation de N_2

Il s'agit de la fixation biologique de N_2 ; celle-ci est évaluée quantitativement soit en pourcentage de N total de la plante, soit en kg N ha^{-1} dans la plante : NdfFix et Ndffix s'il s'agit des parties aériennes et NFix et Nfix s'il sagit du système sol-plante respectivement pour la fixation symbiotique et la fixation asymbiotique.

12 - Fonction de production

Equation y = f (x) de la courbe de réponse de la céréale à l'engrais, avec y = rendement et x = dose azote engrais, le plus souvent de forme quadratique.

13 - Fumure azotée "économe"

Cette fumure s'intègre à l'itinéraire technique appliqué au système de culture "économe" (voir glossaire) ; elle est d'abord appréciée sur le critère de son efficience relative

et plus particulièrement de son efficience réelle (voir glossaire) et ensuite sur le critère de la productivité de l'unité d'azote (voir glossaire) ; elle est généralement en deçà de la dose optimale.

14 - Immobilisation de l'azote engrais

Il s'agit d'une immobilisation (appelée aussi réorganisation) sens large qui correspond à l'azote engrais retenu dans le sol sous forme organique et minérale et "retrouvé" à l'analyse. Dans l'ensemble du profil prospecté par les racines, sa valeur est désignée sous forme abrégée par NiS %.

15 - Indice d'efficience de l'azote (BLONDEL 1971)

L'indice d'efficience est le rapport entre la quantité de grain produite et la quantité d'azote absorbée dans les parties aériennes de la plante ; il définit donc la quantité de grains produite par unité d'azote absorbée par la culture.

16 - Indice de rendement (ou harvest index)

Poids, P total ou N total des grains exprimés par rapport au poids, au P total ou au N total de la plante entière (parties aériennes).

17 - Itinéraire technique (SEBILLOTE 1974, 1978)

Ensemble des opérations techniques étalées dans le temps et liées entre elle dont le résultat de l'une peut dépendre très fortement du résultat de la précédente.

18 - Niveau d'équilibre du système de culture

Le système de culture a atteint ou est proche de son niveau d'équilibre lorsque le solde des pertes (outputs) et gains (inputs) d'azote est nul ou tend vers zéro.

19 - Productivité de l'unité d'azote

Elle représente le nombre de kg de grains produit par kg d'azote engrais apporté ;

la productivité limite est atteinte à la dose optimale (voir glossaire).

20 - Rendement maximum

Lorsque la courbe du rendement en fonction de l'apport d'azote (courbe fonction de production) est de forme parabolique, le rendement maximum correspond effectivement au maximum de la courbe.

21 - Système (FLECHTNER, cité par HESSELBACH 1973),

Nous entendons par système tout rassemblement, combinaison ou ensemble d'"objets" dont les éléments - par opposition à la "quantité" - ne forment pas une simple juxtaposition mais ont des rapports déterminés entre eux et dans leur ensemble. Nous pouvons dire : les systèmes sont des ensembles organisés, dont les constituants sont appelés "éléments", "parties", "membres", suivant le genre d'organisation de l'ensemble et le genre de rapports des constituants entre eux et dans leur ensemble.

22 - Système de culture (TOURTE et BILLAZ 1982)

Composante d'un système de production qui se raisonne à l'échelle d'une surface aliquote de l'exploitation : un champ ou un terroir, en fonction de ses aptitudes agricoles. C'est un ensemble cohérent et organisé de produits et moyens de production. Dans la voie de l'intensification, le choix du système de culture est plus à mettre en cause que les thèmes techniques individuels eux-mêmes dont la méthodologie d'étude est bien connue.

23 - Système de culture "économe"

Ce système cultural applique le minimum d'intrants incluant la fumure minérale, mais en revanche, il met en pratique au maximum les techniques de valorisation des ressources naturelles en vue précisément d'une économie des intrants agricoles.

24 - Système de production (TOURTE et BILLAZ 1982)

Combinaison de production et facteurs de production que l'agriculteur raisonne à l'échelle de son exploitation en fonction de ses objectifs et moyens. Il se caractérise (et se

trouve en même temps largement imposé) par un assolement, un appareil de production, système de culture par exemple, une disponibilité en main-d'oeuvre, qui constituent, en fait, la structure de l'exploitation.

25 - Valeur A

Elle représente la quantité d'azote disponible dans une source (air, sol ou engrais) exprimée en équivalent engrais, de l'engrais apporté pour la mesurer. Exemple : dans une culture de soja non nodulant, on a apporté 120 kg d'N-engrais sous forme de sulfate enrichi en ^{15}N ; à la récolte, la culture absorbe 118 kg N total ha^{-1} et 31,5 kg ha^{-1} N-engrais. Quelle est la quantité d'azote du sol prospectée ou "vue" par la plante (que nous appelons pool d'azote mobilisable), exprimée en équivalent sulfate ? On écrit la relation suivante :

$$\frac{31,5}{120} = \frac{118 - 31,5}{A\ Sol}$$

A sol = 330 kg N ha^{-1} équivalent sulfate.

INTRODUCTION GENERALE

1 - Le problème de l'azote dans les systèmes agricoles de la zone tropicale sèche

En culture pluviale de zone tropicale sèche, on peut schématiquement classer les systèmes agricoles en deux groupes : les systèmes traditionnels et les systèmes améliorés. Naguère, les premiers correspondaient à une agriculture de subsistance n'utilisant pas la rotation mais relativement stable dans le temps lorsque la jachère était pratiquée ; ils sont devenus par nécessité des systèmes extensifs à faibles intrants du fait de la disparition des jachères ; les seconds correspondent à une forme d'agriculture plus intensive appliquant un ensemble de pratiques culturales permettant d'atteindre l'objectif de production visé.

1.1 Les systèmes extensifs à faibles intrants

L'équilibre du système agricole traditionnel a été rompu suite à la réduction du temps de jachère et à plus forte raison, maintenant, suite à sa disparition, entraînant une dégradation de la fertilité des sols. A cet égard, JONES (1971) montre clairement que la jachère de trois ans induit une augmentation moyenne annuelle du taux de matière organique deux fois plus élevée que la jachère de deux ans et que cette jachère de trois ans (*Andropogon gayanus*) accroît la quantité d'azote total du sol de plus de 50 kg N ha^{-1} an^{-1}.

Face à cette situation **d'abandon des jachères, donc d'abandon de ces précieux 50 Kg N ha^{-1} an^{-1}**, sous l'effet de la pression démographique croissante, **l'utilisation des ressources propres du système de production est devenue une nécessité**. Malheureusement, les ressources organiques, les seules envisageables, étant actuellement très faibles (pratiquement inexistantes en zone soudano-sahélienne selon ALLARD *et al* 1983), **il est impératif d'intensifier le système de culture** afin d'accroître lesdites ressources organiques destinées à être investies dans le sol (PICHOT 1975). Cette intensification implique l'augmentation des entrées (inputs) d'azote dans le système par voie essentiellement biologique puisque nous sommes en système "extensif" mais aussi nécessairement par la voie des fumures, celle-ci favorisant celle-là, qui comporte trois aspects : la valorisation maximale des résidus de récolte par le compostage directement ou via l'élevage, l'apport régulier de phosphates contenant si possible du soufre (super-phosphate normal) et le chaulage périodique (quinquennal par exemple), cette dernière pratique étant plus un amendement qu'une fumure.

Le premier aspect n'est pas nouveau. GRAULLE (1950), pour remédier à la "fatigue" des sols engendrée par la culture continue de l'arachide, préconisait un ensemble de quatre mesures : (a) éduquer le paysan ; (b) faire une politique de fumure organique ; (c) développer l'élevage si possible ; (d) utiliser les engrais minéraux. BOUFFIL (1950) abondait dans le même sens, en posant le problème de l'origine de cette fumure organique : "L'apport de fumier exige en premier lieu sa fabrication ; or tout le monde sait qu'en Afrique, on ne fabrique pas de fumier" et plus loin "quant à la production de compost, elle est du domaine de l'impossibilité" ; il préconisait alors l'engrais vert en précisant pour le compost et le fumier: "inapplicables en grand, pour le moment du moins".

Qu'en est-il aujourd'hui ? Les techniques de l'engrais vert naguère et l'enfouissement des pailles plus récemment, associées à celle de l'engrais minéral, ont montré leur insuffisance sur le maintien du bilan organique (PIERI 1989) et en plus, en leur défaveur, des difficultés de réalisation liées à l'extension démographique, croissante du Sud (zone sub-guinéenne et soudanienne-sud d'agriculture et de forêt avec peu d'élevage) au Nord (zone sub-sahélienne essentiellement d'agriculture et d'élevage avec faible intégration des deux). Ces raisons font qu'elles sont pratiquement abandonnées. Les mesures de GRAULLE rappelées ci-dessus sont de nouveau d'actualité et nous les présentons comme **quatre principes agronomiques de base** que nous aurons l'occasion de réitérer à la lumière de nos résultats. Quant aux assertions de BOUFFIL, elles ne sont plus que partiellement vraies au Sud de l'isohyète 700 mm où la pratique du compostage et de l'enfouissement de la matière organique sous forme de fumier ou de compost (région de Séfa, au Sud) et la pratique des étables fumières (région de Tambacounda) semble s'étendre (GUIBERT, communication personnelle).

En revanche, au Nord de cet isohyète, nous en sommes toujours à poser le même problème en quatre temps que BOUFFIL, il y a quarante ans, à propos de l'engrais vert : (a) quelle plante utiliser ? (aujourd'hui, nous posons la question : quel procédé de compostage?, à laquelle nous pouvons apporter des éléments de réponse), (b) comment et à quelle époque l'enfouir ? (aujourd'hui nous en sommes toujours aux projets), (c) quelle en sera la vulgarisation possible (les réponses à la question précédente en conditionneront la réussite), (d) aperçu sur les recherches à réaliser (même remarque qu'au point b).

Les deux autres aspects, phosphatage et chaulage, ont été précisés ces dernières années dans le sens d'une économie des engrais, en particulier dans la zone soudano-sahélienne du Sénégal par PIERI (1982).

Ce système extensif "traditionnel" de naguère est devenu aujourd'hui, en absence de jachère, nécessairement un système extensif à faibles intrants. **Le système "traditionnel", qui existe encore, est ipso-facto en voie de dégradation.**

1.2 Les systèmes agricoles améliorés

Les systèmes agricoles améliorés impliquent par rapport aux précédents, un accroissement des flux d'éléments minéraux : entrées (inputs), sorties (outputs) et flux internes (PIERI 1985). Des inputs insuffisants conduisent à un bilan négatif, entraînant un épuisement rapide de la fertilité dans les milieux physiques et biologiques instables que sont les tropiques arides et semi-arides (CHARREAU 1972). A cet égard, nous citons encore BOUFFIL (1956) encourageant alors l'amélioration des systèmes agricoles : "Augmenter à l'unité de surface le potentiel de production du sol africain par toutes les méthodes modernes de culture à la condition expresse que le "capital sol", que nous prenions techniquement en charge au début de notre action,soit non seulement conservé, mais amélioré".

Dans les systèmes agricoles améliorés, nous distinguons les systèmes améliorés actuellement pratiqués ou vulgarisés et les systèmes intensifs possibles que nous recommanderons à la lumière de nos travaux, soit en raison de la non validité des premiers, soit en raison d'une possibilité de viser une production agricole supérieure, à la portée de l'agriculteur.

En résumé, nous soulignons **la nécessité de l'intensification peu ou prou** ; celle-ci entraîne un accroissement du turn-over qui conduit à augmenter les entrées (inputs) et les sorties (outputs) d'azote.

L'intensification ne peut souffrir de la récession : il faut accroître les ressources naturelles d'azote (fixation de N_2) et les apports de fertilisants, optimiser l'absorption de l'azote par les plantes et en réduire au maximum les pertes.

Ces mouvements divers : fixation de N_2, apports de fertilisants azotés, et pertes d'azote, se trouvent impliqués dans le **"cycle de l'azote"** dont la représentation et surtout la représentation simplifiée est fort répandue de par la littérature. Nous en donnons une idée d'ordre général à la figure 5 page 48 et une autre, simplifiée et conforme aux systèmes que nous étudions, à la figure 33 page 213. Parmi les nombreuses références, nous retenons celle de PIERI (1985) qui a l'avantage de mettre en relief trois aspects essentiels de ce cycle de l'azote : (a) **les compartiments**, (b) **les flux**, (c) **le fonctionnement interne**. Malgré cette simplification, il est hors de question de traiter tous les trois aspects (a), (b) et (c) ; en particulier, nous n'analyserons pas les compartiments et le fonctionnement interne au niveau de la plante et du sol, ce qu'ont fait par exemple SIBAND (1983) pour le mil, et GUIRAUD (1984) pour le cycle interne de l'azote dans le sol. **Mais nous rechercherons les facteurs pouvant optimiser ce fonctionnement interne dans le sens d'une économie de l'azote dans le système de culture.**

Enfin, **nous privilégierons l'étude des flux (inputs et outputs) incluant l'absorption d'azote par les plantes**, sans pour autant approfondir l'étude des processus chimiques et biologiques qui alimentent ces différents flux.

2 - Les objectifs et leur réalisation

Notre objectif est l'étude de la répartition et du devenir de l'azote dans les différents compartiments du système sol-plante afin d'arriver le plus précisément possible à la quantification des inputs et des outputs. Les résultats obtenus sont alors utilisés pour définir les principes régissant la maîtrise du bilan azoté au niveau du système de culture, en vue d'augmenter la production céréalière, avec le minimum d'engrais azotés, sans entamer le capital sol .

Le problème des systèmes agricoles ainsi posé (nécessité de l'intensification) et l'objectif ainsi défini (maîtrise du bilan azoté et économie de l'azote) nous conduisent à préciser notre plan de travail qui permettra de mettre en oeuvre la **stratégie adoptée** pour atteindre **l'objectif visé**, le tout s'inscrivant dans une **démarche scientifique** globale.

Nous distinguons quatre phases dans notre démarche scientifique :

- **une phase descriptive** à partir d'observations et d'enquêtes au champ ;

- **une phase reproductive** par laquelle on tente de réaliser en milieu contrôlé ou semi-contrôlé, ou en laboratoire, un phénomène mis en évidence au champ ;

- **une phase analytique** dans laquelle on essaie de déterminer les facteurs en cause et de comprendre la façon dont ils interviennent ;

- **une phase de retour au champ** dans laquelle on étudie les traitements susceptibles d'être vulgarisés.

La troisième phase devrait conduire à la généralisation et la quatrième à l'application en milieu réel.

Notre stratégie d'économie de l'azote consiste d'une part, à utiliser au maximum les légumineuses pour enrichir le pool d'azote du sol et d'autre part à déplacer le flux de consommation de l'azote du sol, de la légumineuse (en lui assurant cependant le minimum vital pour sa productivité) vers la céréale qui doit exploiter au mieux ce pool d'azote du sol en vue d'économiser les engrais azotés. Par ailleurs, on cherche à réduire le plus possible

les pertes d'azote provenant de l'engrais. Cette stratégie s'applique au système de culture composé de la céréale et de la légumineuse en rotation.

Dans notre étude, l'azote 15 est utilisé comme traceur, afin de suivre qualitativement et quantitativement le devenir de l'azote engrais dans le système sol-céréale, et d'évaluer quantitativement la part respective des trois sources d'azote : l'atmosphère, le sol et l'engrais, dans la légumineuse.

Notre plan de travail comprend quatre volets successifs :

a) l'élaboration de méthodes et techniques qui permettent de quantifier les flux d'azote *in situ* et d'apprécier le degré de réalisation de la stratégie mise en oeuvre ;

b) l'application du volet (a) à l'étude de l'optimisation de l'utilisation de l'azote du sol et de l'engrais dans le système sol-céréale ;

c) l'application du volet (a) à l'étude de la contribution des légumineuses au pool d'azote du sol ;

d) une tentative de formulation d'un diagnostic sur l'évolution de la fertilité azotée du sol fondé sur la connaissance des principaux flux d'azote dans les systèmes (inputs et outputs).

On pourra ainsi vérifier la validité de certains systèmes de culture actuellement pratiqués et simuler des systèmes possibles compte-tenu des voies d'optimisation étudiées aux volets (b) et (c).

CHAPITRE I - CADRE DE L'ETUDE

I.1 - Le milieu climat - sol - végétation

I.1.1 - Le climat

I.1.2 - Les sols

1.2.1 - Caractéristiques des sols sur sable quaternaire

1.2.2 - Caractéristiques des sols sur Continental Terminal

1.2.3 - Evolution annuelle du taux d'azote minéral des sols.

1.2.4 - Description des sols des différents essais.

I.1.3 - La végétation

I.2 - Situation agricole céréalière présente et en perspective au Sénégal.

Dans ce chapitre nous abordons deux points: (a) description du milieu climat - sol - végétation, (b) aperçu de la situation agricole céréalière présente et à venir au Sénégal. La raison du point (b) est de montrer l'actualité et l'importance d'une stratégie sur l'économie de l'azote dans la mise en oeuvre du Plan céréalier national (objectif an 2000), stratégie dans laquelle les légumineuses doivent jouer un rôle capital.

I.1 - Le milieu climat - sol - végétation

La dégradation des écosystèmes des pays sahéliens résulte de l'interaction de deux facteurs indépendants : l'un circonstanciel et naturel : phase de raréfaction des pluies ; l'autre humain et résultant de causes anciennes et à effet cumulatif : la dégradation croissante des sols, conséquence en grande partie de la suppression des jachères, processus inéluctable dû en particulier à la poussée démographique des trente dernières années.

I.1.1 - Le climat

Le climat de la zone tropicale sèche africaine, en particulier celui du Sénégal, se caractérise par une opposition tranchée entre une saison des pluies dont la durée varie entre trois et cinq mois et une saison sèche pendant laquelle la pluviosité est nulle.

Les isohyètes généralement retenues pour caractériser les zones écologiques sont calculées sur une moyenne de trente années entre 1930 et 1960 (figure 1). Cependant, la détérioration du régime pluviométrique depuis une quinzaine d'années a conduit les bioclimatologistes à modifier les isohyètes (figure2) et retenir des seuils de probabilité de pluie de 20, 50 et 80 %, en vue d'accroître les chances de succès agricole (figures 3 et 4 et tableaux 1A et 2A en annexe). Selon DIAGNE et VANDERSHMIDT (1989 non publié), à la probabilité d'atteindre ou de dépasser cinq années sur dix la pluviométrie, au Sénégal :

- à la limite nord, en zone sahélienne, où la moyenne était de 400 mm, on enregistre seulement 200 mm ;

- au centre, en zone soudanienne, où la moyenne était de 800 mm, on enregistre seulement 500 mm ;

- au sud-ouest, en zone sub-guinéenne où la moyenne était de 1400 mm, on enregistre seulement 1000 mm.

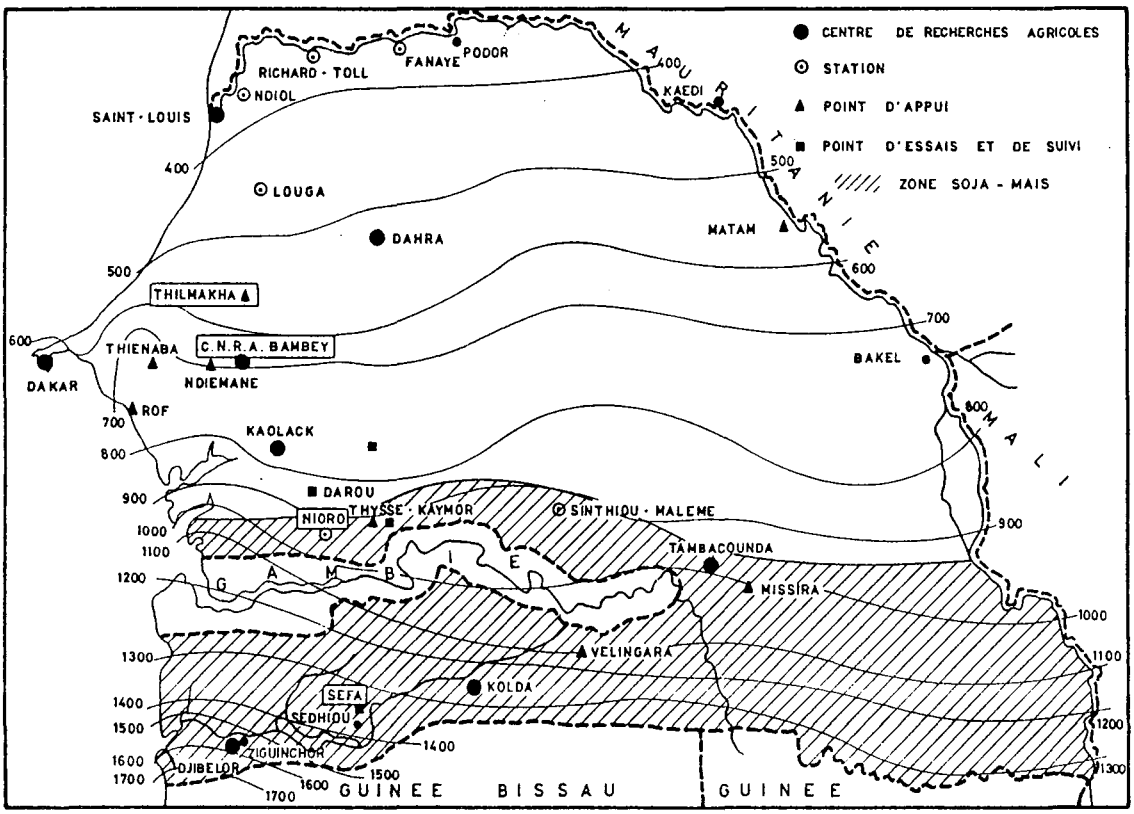


Figure 1 : Carte géographique du Sénégal précisant l'implantation des essais, des isohyètes (1930 à 1960) et de la zone de culture du soja et du maïs.

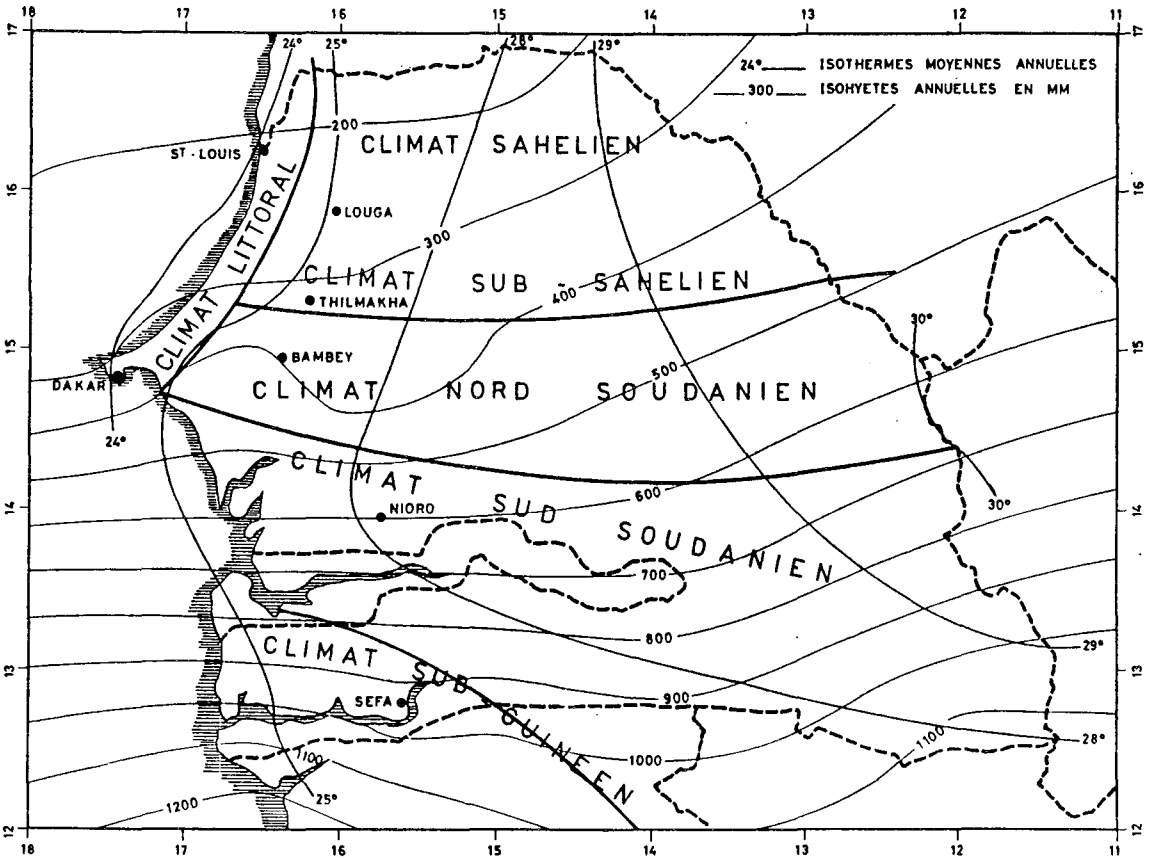


Figure 2 : Isohyètes correspondant à la période 1968-1987 pour Bambey, Nioro et Séfa et 1972-1987 pour Thilmakha. Pluviométrie atteinte ou dépassée à la probabilité de 50 %. Isothermes annuelles et principaux climats d'aprés ADAMS et al (1965).

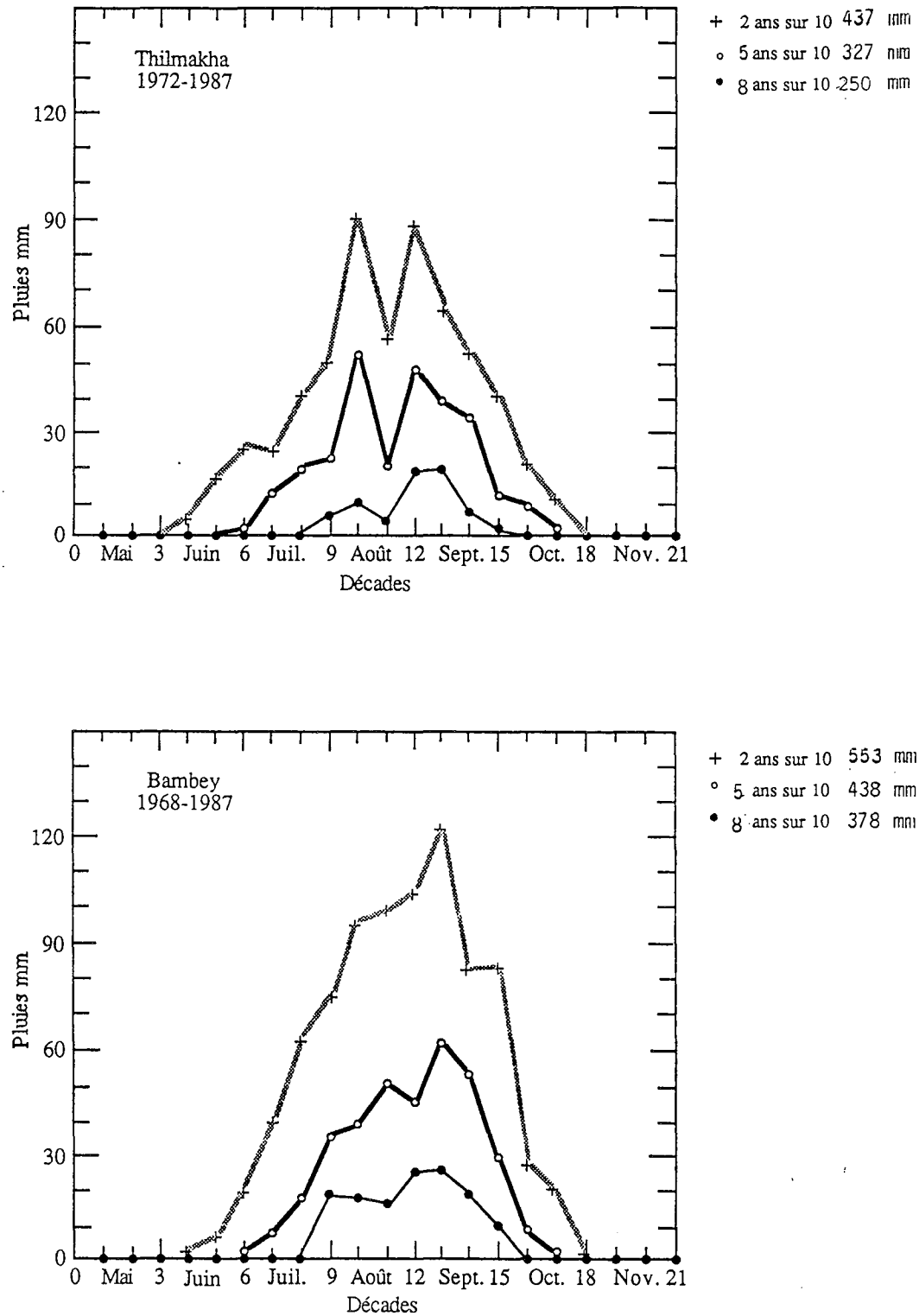


Figure 3 : Espérance de pluviométrie 2, 5 et 8 années sur 10. Stations de Thilmakha et de Bambey. D'aprés DIAGNE et VANDERSCHMIDT (non publié).

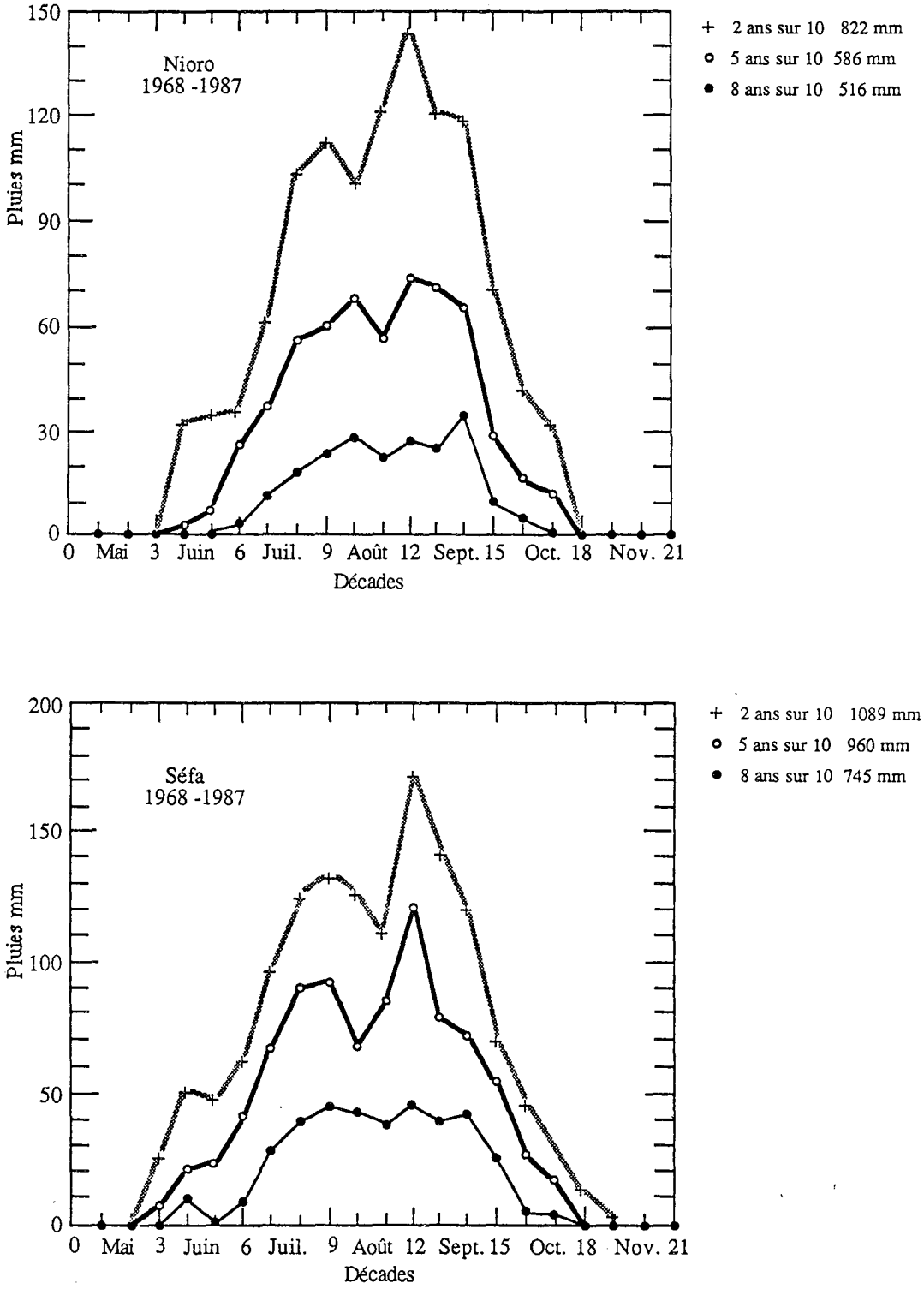


Figure 4 : Espérance de pluviométrie 2, 5 et 8 années sur 10. Stations de Nioro et de Séfa. D'aprés DIAGNE et VANDERSCHMIDT (non publié).

Pendant la saison des pluies, la demande évaporative d'origine climatique (évaporation d'eau libre en bac normalisé classe A) passe en moyenne de 3,5 mm $jour^{-1}$ au sud à 5,2 mm $jour^{-1}$ au nord (DANCETTE 1976). Ces variations correspondent à une augmentation des conditions d'aridité vers le nord : faible pluviosité, températures élevées, degré d'hygrométrie faible, vents forts et végétation clairsemée.

I.1.2 - Les sols

Les sols supportant les cultures pluviales (cultures sans autres apports d'eau que la pluie) sont principalement des sols sableux ferrugineux tropicaux avec nette prédominance de la kaolinite dans la fraction argileuse et secondairement des sols à tendance calcimorphe et vertique plus ou moins riches en montmorillonite.

On doit distinguer suivant le matériau marental, deux grands types de sol : les sols sur sable quaternaire et les sols sur matériau sablo-argileux du Continental Terminal (grés argileux d'origine continentale provenant du démantèlement du Fouta-Djallon).

Les premiers sont représentés dans la zone septentrionale à pluviométrie comprise entre 300 et 700 mm, tandis que les seconds intéressent les zones méridionales à plus forte pluviométrie comprise entre 700 à 1300 mm (figure 1).

I.1.2.1 - Caractéristiques des sols sur sable quaternaire :

- sol beige à horizon peu différencié ;
- teneur en matière organique inférieure à 1 % ;
- teneur en azote total inférieure à 0,015 % ;
- granulométrie : argile $<$ 5 %
  limon $\simeq$ 2 %
  sable fin $<$ 70 %
  sable grossier $\simeq$ 25 %

- capacité d'échange :
  . somme des bases échangeables $\simeq$ 2,0 meq 100 g^{-1}
  . capacité totale d'échange $\simeq$ 2,2 meq 100 g^{-1}
- pH (H_2O) : environ 6,0.

Tableau 1 : Les grands types de sols (d'après MAIGNIEN 1965)

TYPES DE SOLS		ROCHES MERES	POSITION TOPOGRAPHIQUE	CARACTERISTIQUES
Sols ferrugineux tropicaux lessivés	**Sols "diors" * sur dunes de sable**	Sables dunaires	Sols formés sur dunes de sable sur topographie plane	- Sols très sableux : 2 à 4 % d'argile ; très profonds, lessivés en fer ; matière organique à faible teneur et mélangée dans le profil ; très perméables - Sols légers.
Intergrade sols ferrugineux et sols vertiques	**Sols "dek"**	Marnes Grès calcaire Grès argileux	En position dépressionnaire (marigots, anciens bras de cours d'eau)	- Sols sableux, plus argileux : 3 à 8 % d'argile ; plus lourds et mieux structurés que les "diors" - Horizon humifère bien marqué - Présence de montmorillonite.
Sols rouges ferrugineux tropicaux lessivés sur roches et colluvions du continental terminal	Sols rouges typiques	Grès argileux du continental terminal	Sur relief à profil convexe, systèmes de plateaux interfluves...	- Faiblement argileux en surface (8 à 12 %) ils deviennent très argileux en profondeur jusqu'à 50 % d'argile ; la différenciation des horizons pédologiques est faible et peu apparente. - Sols profonds
	Sols rouges lessivés à taches et concrètions	Grès argileux du continental terminal	Sur plateaux	- Sols moins profonds, plus lessivés que les sols rouges typiques ; présence de traces de remaniement (débris poterie, charbon, morceaux de cuirasse démantelée)
	Sols rouges de transition	Matériau du continental	Localisés sur versants et les zones de raccordement	Variations latérales portant sur les horizons A et AB sur une toposéquence, ces sols sont intermédiaires entre les sols rouges et les beiges.
Sols beiges ferrugineux tropicaux lessivés à taches et à concrétions	**Sols "beiges" de plateau**	Matériau du continental	Localisés sur les plateaux où le réseau hydrographique est discontinu et rare. Topographie plane (bas plateaux)	- Horizons bien différenciés argileux, plus de 50 % d'argile en profondeur. Lessivage important (taches et concrétions). Représentent le terme ultime du lessivage en sols ferrugineux tropicaux. - Tendance à l'hydromorphie
Sols vertiques	**"Argiles noires"**	Affleurement de marnes à attapulgite et formations marno-calcaires	W du Sénégal ; notamment presqu'île du Cap-Vert et plateau de Bargny	Epaisseur moyenne de 80 à 100 cm. Riches en argile (40 à 70 % de montmorillonite presque pur). Pauvres en matière organique.
Sols sulfatés acides et "tann"		Formés sur d'anciennes vasières	Littoral Sud du Sénégal depuis la Petite Côte jusqu'en Casamance (Sud)	- Population caractéristiques de mangrove - Sols salés à alcalis
Sols "holalde"		Alluvions fluviatiles	Le long de la vallée des fleuves	Sols à caractéristiques vertiques
Cuirasses ferrugineuses		Grès argileux Roches granitiques Roches volcaniques	- Le sommet des plateaux - Le long des axes de drainage	Surface d'érosion très étendue impropre à la culture et irréversible

* en caractère gras : les sols étudiés.

I.1.2.2 - Caractéristiques des sols sur Continental Terminal

- sols beige ou rouge à horizon humifère de 0 à 15 cm bien marqué ;
- teneur en matière organique voisine de 1 % (sols ferrugineux tropicaux) ;
- teneur en azote total comprise entre 0,015 et 0,025 % ;
- granulométrie :
  - . argile < 12 %
  - . limon ≃ 5 %
  - . sable fin < 60 %
  - . sable grossier ≃ 30 % ;

- capacité d'échange :
  - . somme des bases échangeables ≃ 3,0 meq 100 g^{-1}
  - . capacité totale d'échange ≃ 3,5 meq 100 g^{-1} ;
- pH (H_2O) : environ 6,3.

Ces deux types de sols présentent des qualités physiques médiocres: structure peu développée, trés faible stabilité structurale, trés mauvaise rétention de l'eau (faiblesse du complexe colloïdal) : réserve en eau facilement utilisable (R.F.U.) de 3 à 10 % et trés faible teneur en phosphore assimilable, inférieure à 10 ppm. Les sols sur sable quaternaire se classent toujours parmi les plus pauvres mais présentent des potentialités agricoles relativement élevées lorsqu'ils n'ont pas été dégradés par une surexploitation.

On observe sur ces deux "groupes" de sols une augmentation de la teneur en azote total suivant le gradient pluviométrique.

I.1.2.3 - Evolution annuelle de la teneur en azote minéral des sols

La plus grande partie de l'azote se trouve dans le sol sous forme organique. On observe cependant une accumulation d'azote minéral, essentiellement sous forme ammoniacale, au cours de la saison sèche. Cette accumulation d'azote ammoniacal résulte du maintien de l'activité de la microflore ammonifiante à des pF supérieurs à 4,2 (DOMMERGUES et MANGENOT 1970). Dès les premières pluies, l'activité des germes nitrifiants est explosive (BLONDEL 1970) ; le taux de nitrate du sol croît brutalement. Cette période d'accumulation d'azote nitrique dans le sol est très fugace. La disparition de l'azote nitrique serait la résultante de la lixiviation et de l'immobilisation.

L'intensité des phénomènes de minéralisation en début de saison des pluies est un argument majeur en faveur du semis précoce.

Par la suite, la minéralisation nette devient nulle sauf si l'irrégularité des pluies entraîne un hygropériodisme marqué pouvant réactiver la minéralisation de l'azote par effet BIRCH (BIRCH 1958) ; ce phénomène a été observé à Bambey en 1972 (GANRY 1980). Lorsque le sol est en phase de minéralisation nette nulle, les céréales, par contre, sont généralement en phase d'absorption active de l'azote minéral. En présence de ce double processus apparemment paradoxal, l'hypothèse d'une minéralisation et d'une nitrification rhizosphériques fut émise par DOMMERGUES (1969 non publié) et confirmée par la suite (BLONDEL 1970, GANRY 1973).

I.1.2.4 - Description des sols des différents essais

Les sols sur lesquels ont été réalisés nos essais, afin de mieux situer leur place dans l'ensemble des grands types de sols cultivés au Sénégal, sont donnés au tableau 1 représentant cet ensemble (ils y apparaissent en caractère typographique "gras"). Les tableaux récapitulatifs des essais menés sur céréales et légumineuses, renvoient à ces types de sol (tableau 4 et 21 pages 78 et 159).

I.1.3 - La végétation

La végétation, qu'elle soit naturelle ou cultivée, est influencée par les caractéristiques du sol, notamment par ses propriétés physiques. Inversement, elle exerce une action directe sur les propriétés des sols et le profil cultural, et intervient sur les rendements agricoles des plantes qui lui succèdent. Dans notre stratégie de recherche, déjà définie en introduction, qui doit permettre, rappelons-le, d'oeuvrer conjointement dans le sens: (a) d'un accroissements de la productivité du sol, (b) d'une économie maximale de l'engrais azoté,(c) d'un maintien de la fertilité du sol, les légumineuses, outre leurs multiples rôles, notamment d'oléagineux et de protéagineux, sont perçues comme pourvoyeur essentiel d'azote exogène (N_2) bon marché au système de culture et en particulier au système producteur de céréales. C'est la raison pour laquelle il nous parait utile de décrire d'un point de vue agro-écologique les légumineuses cultivées et spontanées au Sénégal. Nous distinguons :

- les légumineuses à graines ;
- les légumineuses fourragères ;
- les légumineuses spontanées (arbres et plantes herbacées).

Nous exposons à part le problème céréalier dans son contexte alimentaire et économique lié étroitement au problème de l'engrais que nous évoquons également. Nos sources d'informations proviennent du Ministère du Développement Rural (M.D.R. 1987).

I.1.3.1 - Légumineuses à graines

Les principales légumineuses à graines des zones tropicales semi- arides sont l'arachide (*Arachis hypogea*) et le niébé (*Vigna unguiculata*) anciennement cultivées, et le soja (*Glycine max*) nouvellement introduit en Afrique.

Arachis hypogea (arachide)

Cette légumineuse oléagineuse industrielle et secondairement vivrière est de loin la plus cultivée dans les sols sableux de la zone tropicale sèche entre les isohyètes 300 et 1200 mm : (a) pour des raisons économiques d'abord, sa culture a été développée après 1945 pour satisfaire les fortes demandes en corps gras de l'Europe. C'est ainsi qu'à cette date, de vastes étendues forestières furent défrichées dans le sud du Sénégal pour en permettre la culture et accroître les exportations vers l'Europe. A l'heure actuelle, au Sénégal, environ un million d'hectares sont cultivés avec un effort national d'intensification. Ces exportations restent le pivot de l'économie nationale ; (b) pour des raisons "agro-écologiques" ensuite, l'arachide est souvent la seule culture de légumineuse possible dans la rotation, dans les zones soudano-sahéliennes. Jusqu'à l'isohyète 800 mm, l'arachide entre dans la rotation avec le mil une année sur deux ou trois; entre 800 et 1100 mm, elle entre en rotation avec le mil, le sorgho, le maïs et le cotonnier une année sur deux (exemple : maïs ou mil - arachide - sorgho - arachide) ou une année sur quatre (exemple: maïs ou mil - cotonnier - sorgho - arachide) (NICOU 1978). En 1986, année à pluviométrie favorable, le rendement moyen en gousses a été de 1050 kg ha^{-1} sur une surface de 800.000 ha.

L'adéquation des cycles végétatifs et pluviométriques permet sa culture sous tous les isohyètes. Les arachides dont le cycle végétatif est de 90 jours ont des besoins hydriques d'environ 420 mm. Pour les cycles de 120 jours les besoins hydriques sont d'environ 600 mm. Il est donc manifeste que les arachides à cycle végétatif court auront le plus de chance de réussir dans les zones à pluviométrie inférieure à 650 mm en moyenne, soit 450 mm au seuil de probabilité de pluie de 50 %. (Rappelons qu'à Bambey, cinq années sur dix, on enregistre des pluviométries inférieures à 450 mm).

Glycine max (soja)

Dans les zones à pluviométrie supérieure à 700 mm, le soja est sans aucun doute la légumineuse à la plus forte potentialité de production protéique. Au Sénégal, le rendement moyen obtenu en station varie de 25 q M.S. ha^{-1} à Nioro (isohyète 900 mm) et 30 q M.S ha^{-1} à Séfa (isohyète 950 mm). Traditionnellement, cette légumineuse n'est pas encore cultivée en Afrique de l'Ouest tropicale sèche, mais son développement est prévisible. Au Sénégal, aprés un essor significatif qu'on peut résumer en trois étapes: (a) une phase de recherche appliquée poussée (LARCHER *et al.* 1984), (b) un développement amorcé avec succés en milieu rural, (c) une inscription dans le Plan alimentaire national, pour des raisons objectives difficiles à comprendre, cet essor a été stoppé.

Vigna unguiculata (Niébé)

L'intérêt de cette culture vivrière est considérable dans la zone soudano-sahélienne septentrionale où, en saison sèche, elle constitue souvent la principale ressource vivrière des populations, grâce principalement à son cycle végétatif très court (75 jours semis-récolte). Malheureusement, ses rendements stagnent (en moyenne 450 kg grains ha^{-1} sur 115.000 ha^{-1} en 1986) en raison vraisemblablement d'une application insuffisante des techniques ; son extension est aussi freinée par des problèmes phytosanitaires et de commercialisation non encore résolus. Le niébé est très souvent cultivé en culture associée avec le mil ou en culture dérobée après celui-ci. Sa fixation de N_2 est assurée par les mêmes bradyrhizobiums que ceux de l'arachide (Groupe cowpea).

I.1.3.2 - Les légumineuses fourragères

La culture fourragère et notamment les légumineuses fourragères sont l'objet d'un intérêt croissant dans les zones soudano-sahéliennes et soudano-guinéennes et en particulier dans les zones où la paille d'arachide ne permet pas de satisfaire les demandes en fourrage de l'embouche et de l'élevage sédentaire. La sédentarisation de l'élevage timide pour l'instant, conséquence de l'intensification des systèmes agraires d'agriculture attelée, se traduit par une utilisation plus intensive des produits cellulosiques avec un mélange équilibré de paille d'arachide et de mil. Mais ces pailles sont insuffisantes. Compte tenu de la pauvreté en azote des pâturages naturels, une source de matière azotée digestible apparaît nécessaire au développement de cette valorisation des produits cellulosiques. (voir page 224).

Les surfaces en légumineuses fourragères dans l'assolement, à même de fournir ce complément de matière azotée pour l'élevage, doivent permettre, en outre, d'augmenter les apports d'azote autres que l'engrais dans le système de production et de retrouver les effets bénéfiques de l'ancienne jachère dans l'assolement.

Parmi les espèces en cours d'introduction les *Stylosanthes* (herbe) et *Leucaena* (arbuste riche en protéines) semblent prometteuses. *Stylosanthes hamata* et *Leucaena leucocephala* justifient l'inoculation ; en revanche, *Stylosanthes humilis* peu spécifique vis-à-vis des rhizobiums ne la justifie pas (OBATON 1974). Pour les zones humides, sous une pluviométrie minimum de 900 mm, *Stylosanthes guanensis* doit être préféré.

I.1.3.3 - Les légumineuses spontanées

Parmi les légumineuses spontanées, on doit distinguer les arbres des plantes herbacées.

L'arbre légumineuse le plus important de la zone soudano-sahélienne est l'*Acacia albida*. De nombreux auteurs : CHARREAU et TOURTE (1967), JUNG (1969), DANCETTE et POULAIN (1968) et DANCETTE et HALL (1979), ont montré l'importance de cet arbre dans les systèmes agraires : (1) en agriculture traditionnelle sénégalaise de type sérère, il peut compenser, sous son couvert, le manque de fertilisation chimique, (2) ses avantages agroclimatiques sont indéniables (brise-vent notamment). Une question reste cependant posée: l'apport d'azote au sol réalisé lorsque ses feuilles tombent en début de saison de culture (apport identique à celui d'un engrais vert en début de cycle végétatif dont l'azote semble *a priori* exogène au système sol-arbre) provient-il du sol, de la nappe phréatique ou de la fixation symbiotique de N_2 ?

Avec de nombreux autres acacias sahéliens, ces arbres jouent un rôle **alimentaire** (survie du cheptel due en grande partie aux acacias, en fin de saison sèche), **technique** (gomme de l'*Acacia senegal*, bois de chauffage) et **social** (médecine traditionnelle).

Les légumineuses herbacées spontanées ont été observées par OBATON (1974) qui remarque que la nodulation est présente partout mais souvent faible (exemple : *Vigna* sauvage 8-10 nodules, *Vigna* cultivé 53 nodules). SIBAND (1974) remarque que les forêts du Sud Sénégal (pluviométrie 1000 - 1200 mm) abritent une population herbacée essentiellement graminéenne sans légumineuses, exigeante en azote ; en revanche, les sols anciennement cultivés au delà de 13 ans de défriche, "fatigués" et pauvres en azote, abritent des légumineuses (*Indigofera, Rhynchosia, Sesbania, Vigna et Cassia*).

I.2 - Situation agricole céréalière présente et en perspective au Sénégal (M.D.R 1987)

Le Sénégal est un pays consommateur de céréales, beaucoup plus que de tubercules. Les principales céréales cultivées sont dans l'ordre décroissant : le mil, le sorgho, le riz et le maïs.

En 1986, pour une production totale de 890.000 tonnes, soit 620.000 tonnes d'équivalent produit consommable (E.P.C), la proportion et le rendement moyen (entre parenthèses) de ces quatre céréales ont été de 54 % (586 kg ha^{-1}), 15 % (961 kg ha^{-1}), 15 % (2044 kg ha^{-1}) et 13 % (1139 kg ha^{-1}). Pour les mils et sorghos, les objectifs nationaux de production ont été atteints, malheureusement les rendements du mil stagnent toujours. Pour le maïs, la production accuse une baisse sensible due principalement à la chute des rendements qui passent de 1450 à 1150 kg
ha^{-1} laissant poindre un processus inquiétant compte tenu des objectifs de production visés pour la prochaine decennie. L'équilibre vivrier a été rétabli par l'importation de riz
(350.000 t) et par l'aide alimentaire.

L'objectif de l'an 2000 est de porter le taux de couverture des besoins céréaliers du pays par la production interne, de 52 % à 80 %, en augmentant la production respectivement pour le mil/sorgho, le riz et le maïs pluvial : de +15 %, de +520 % (le riz pluvial représentera 19 % de la production rizicole irriguée) et +235 %. Cet accroissement de la production céréalière sera principalement obtenue par une augmentation des rendements dont les prévisions sont de 700 kg ha^{-1} (+10 %) pour le mil/sorgho, 6800 kg ha^{-1} (+240 %) pour le riz irrigué, 1700 kg ha^{-1} (+50 %) pour le maïs pluvial. L'extraordinaire augmentation espérée des rendements du riz ne pourra résulter que de la mise au point de nouvelles technologies dans le delta et la vallée du Fleuve Sénégal. Une production de maïs irriguée de 13.000 t est prévue, mais elle représentera seulement 5 % de la production escomptée en maïs pluvial.

En culture pluviale, le maïs devrait donc connaître un développement spectaculaire dans les années à venir. En zone soudanienne sud (isohyètes 700 à 900 mm), le sorgho cédera ses surfaces au maïs, ce qui se fait déjà progressivement ; plus au sud (isohyètes 900-1200 mm), le maïs, avec le sorgho, entreront dans la rotation avec l'arachide ou le soja et le cotonnier.

L'analyse des besoins alimentaires actuels, qui sont pour les populations rurales de 49% de mil/sorgho, de 38 % de riz, de 8 % de blé et seulement de 5 % de maïs, met en relief l'intérêt de la production milicole, mais montre, compte tenu des objectifs nationaux, la nécessité d'une valorisation alimentaire du maïs, qui devient une priorité nationale.

La réduction du déficit alimentaire national rencontre des contraintes d'ordre climatologique, démographique, agronomique et phytosanitaire qui peuvent surgir séparément ou en association. La contrainte agronomique est sans doute celle sur laquelle l'homme peut avoir le plus d'emprise mais elle est paradoxalement la plus menaçante en raison principalement de la dégradation croissante de la fertilité des sols et de l'insuffisance des efforts déployés pour lutter contre ce fléau ; pourtant, résoudre les problèmes qu'elle soulève, atténuerait les préjudices dus aux autres contraintes! Parmi les causes de cette dégradation, la plus évidente est l'insuffisance des fumures minérales et la régression dans l'approvisionnement des engrais azotés. Cette insuffisance n'apparait pas au niveau national dans la consommation des engrais ternaires NPK, mais on observe toujours une tendance à la désaffection des céréales au profit des cultures industrielles pour cet engrais NPK, celles-ci nécessitant environ 20.000 t contre 17.000 t pour celles-là (année 1987) ; en revanche, la régression est nette pour l'urée dont l'approvisionnement national est destiné à 75 % aux céréales. En totalité, 7.400 t d'urée seulement ont été commandées en 1987 représentant respectivement pour le mil/sorgho, le riz et le maïs, 0 %, 60 % et 30 %, alors que les besoins tournent autour de 15.000 t ! Cette insuffisance de la fertilisation azotée est surtout liée au mode de cession (prix et crédit) et de distribution de l'urée.

Cette brève analyse de la production actuelle et des perspectives de développement des céréales nous amène à faire un diagnostic et soulève des questions cruciales :

- les rendements du mil obtenus en parcelles sans engrais azoté dans nos essais au champ sont faibles, de l'ordre de 600 kg ha^{-1} ; ils sont du même ordre que ceux du reste du pays; or, le mil est la seule céréale à ne pas recevoir d'engrais azoté simple alors qu'il reçoit de l'engrais ternaire NPK (M.D.R. 1987) ; la principale raison de la faible productivité milicole, endémique, n'est-elle pas la faible fertilité azotée des sols et l'absence de fertilisation azotée?

- le rendement moyen du maïs au niveau national est satisfaisant comparativement aux rendements obtenus en expérimentation au champ. L'extension considérable prévue de cette céréale exigeante en azote, requiert un accroissement proportionnel des approvisionnements en engrais azotés. Cette extension ne risque-t-elle donc pas d'être compromise si les difficultés actuelles du marché de l'urée ne sont pas résolues ? En tout état de cause, l'accroissement de l'efficience de l'urée sur maïs est un impératif en raison du lourd investissement financier qui va être demandé. A titre d'exemple, dans l'hypothèse favorable d'une réalisation à 80 % des objectifs nationaux, à savoir : (a) une production annuelle de 200.000 t de maïs grain, (b) un rendement moyen de 1.500 kg M.S ha^{-1} obtenus par un apport de 150 kg d'urée ha^{-1},

(c) une productivité de l'unité d'azote de 15 (voir glossaire), la quantité d'urée nécessaire sera de 20.000 t an^{-1}, soit dix fois plus grande qu'en 1986 ! Un accroissement de la productivité de l'unité d'azote urée de 15 à 20 (voir glossaire) qui est techniquement possible (ce que nous montrerons au chapitre IV), entraînerait une économie de 5000 t d'urée !

CHAPITRE II - LES ELEMENTS DU BILAN AZOTE

II.1 - Les approches du bilan de l'azote dans l'agrosystème

II.1.1 - Bilan sur plusieurs années (premiere approche)

II.1.2 - Bilan réel des différents flux d'azote (^{15}N) (deuxième approche)

II.1.3 - Bilan "troisième approche" : détermination des outputs inconnus.

II.2 - Bilan de l'engrais azoté dans le système sol-plante

Avant de préciser la nature de l'importance des termes (les "entrées" ou inputs, les "sorties" ou outputs) du bilan de l'azote, il est nécessaire de bien préciser le niveau où doit se situer cette évaluation. En effet, si la notion d'input ou d'output est sans ambiguïté en ce qui concerne les engrais minéraux, la fixation biologique de N_2, les pertes par lixiviation ou dans l'atmosphère, elle nécesite une clarification en ce qui concerne la fumure organique, les exportations par les récoltes et d'une façon plus générale les transferts de fertilité. A cet égard, il convient de distinguer les restitutions organiques et minérales dues à la culture en place, des apports exogènes qui réalisent en fait un transfert de fertilité. L'avantage de celles-là en système cultural amélioré est de freiner la baisse du niveau de fertilité alors que celles-ci (exogènes) sont susceptibles d'enrichir le capital fertilité - du moins de le maintenir - mais à des degrés différents selon les dimensions de l'unité de production à laquelle on s'adresse:

- le champ

Le champ est le support du système de culture. La continuité d'un système de culture engendre un agrosystème désigné ainsi par analogie avec l'écosystème sous végétation naturelle.

A l'échelon d'une exploitation, on peut fertiliser un champ par des matières organiques provenant de cette exploitation mais toujours aux dépens d'une autre surface productive. De ce fait, **la surface exploitée est inférieure à la surface productive**. Au niveau de l'agrosystème, l'animal est perçu comme une étape dans le recyclage des résidus de récolte ;

- le bassin versant

Ce terme désigne en géomorphologie un ensemble de sols en pente qu'on peut distinguer selon leur position topographique : (a) plateau, (b) sommet de la pente, (c) bas de la pente, (d) dépression ; ces sols sont soumis à deux processus : l'érosion et le lessivage oblique opérant ainsi un transfert de fertilité du plateau vers la dépression. Un autre transfert de fertilité peut être dû aux animaux dont le parcage a lieu dans la dépresssion ;

- l'exploitation

L'exploitation est le lieu de réalisation du système de production. Les résidus de transformation des produits agricoles (rizeries, décortiqueries), les composts urbains et les produits forestiers, peuvent contribuer à maintenir la fertilité d'une exploitation, mais, même disponibles, ils seraient insuffisants en système amélioré ;

- le pays

D'une façon générale, sans apports exogènes à l'unité de production considérée, les seuls produits de l'unité ne peuvent obvier aux déséquilibres minéraux apparus ou apparaissant (hormis peut-être les pays chauds forestiers). C'est ainsi qu'à l'échelle d'un pays comme le Sénégal on peut calculer grossièrement, ce que représentent les déperditions en éléments minéraux, en estimant la production végétale moyenne annuelle à 850 000 t d'arachide et 900 000 t de céréales (équivalent mil) (voir paragraphe I.2 page 40). En supposant que la situation actuelle est au mieux, à **mi-restitution**, c'est de l'ordre de 200 000t d'engrais et 25 000 t de chaux qui sont chaque année prélevées du patrimoine foncier (TOURTE 1973, non publié). Même une gestion des ressources en matière organique du pays ne pourrait éviter ces déperditions et empêcher le bilan minéral de devenir négatif.

Dans un système de culture, les flux d'azote : inputs, outputs et transferts, se distribuent autour de deux principaux pools : le sol et la plante. La figure 5 en est un modèle d'explication simplifié ; elle présente ces deux principaux pools avec leurs inputs, outputs et transferts. L'ensemble est inspiré de WETSELAAR et GANRY (1982).

Le pool azote plante peut être divisé en trois sous pools selon l'origine de l'azote: (a) azote provenant de la fixation de N_2 (légumineuses et non légumineuses), (b) azote provenant de la minéralisation de la matière organique, (c) azote provenant de l'engrais. Le calcul de ces différents termes est examiné ci-après.

Le pool azote plante reçoit l'azote à travers les processus d'absorption d'azote à partir du sol, à partir de la fixation symbiotique de N_2 dans une moindre mesure à partir de l'atmosphère (par absorption d'ammoniac). Il perd son azote à travers les processus de volatilisation ammoniacale à partir des parties aériennes (pertes gazeuses), et essentiellement de récolte. La durée de vie du pool azote plante est celle de la saison de culture pour une culture annuelle mais peut durer plusieurs années dans le cas de plantes pérennes.

Le pool azote sol est souvent considéré comme le résultat de la combinaison de trois sous-pools : (a) sous-pool d'azote minéral, (b) sous-pool d'azote minéralisable sens strict (c) sous-pool d'azote organique biologiquement plus stable, avec des échanges permanents entre eux résultant des processus d'immobilisation et de minéralisation.

Par sous-pool d'azote mobilisable, nous désignerons ci-après le stock d'azote potentiellement disponible à la plante, donc par rapport à (b) ci-dessus, il s'agit d'un sous-pool d'azote minéralisable sens large. Le pool d'azote sol reçoit son azote (inputs) à travers

des processus non biologiques et biologiques : précipitations (Np), fertilisation (NF), semences (Nsem), fixation libre de N_2 (Nfix), restitution des résidus de récolte incluant la biomasse racinaire (Nr), matière organique transformée ou non par l'animal (Nc). Il perd son azote (outputs) à travers trois processus majeurs : (a) volatilisation de NH_3, dénitrification biologique et secondairement chimique, ces dernières étant accentuées en conditions défavorables d'acidité et de sécheresse (CHABALIER 1976) et brûlis, les trois désignés par Nv, (b) lixiviation, érosion et ruissellememt, les trois désignés par Nl, (c) absorption d'azote par la plante désignée par Ns.

L'importance des inputs et des outputs dépend largement des processus impliqués dans les système étudiés. la rigeur des résultats dépend également de ces processus ; ainsi, les résultats concernant les précipitations, les engrais, la fixation symbiotique de N_2, la mobilisation de l'azote par la plante à partir du sol, sont-ils relativement rigoureux tandis qu'une incertitude assez grande affecte les résultats de fixation libre de N_2 (Nfix), de pertes gazeuses (Nv) et de pertes dans et sur le sol (Nl).

Excepté pour l'absorption par la plante et la lixiviation, la majorité des autres processus est de nature microbiologique, en particulier la fixation de N_2 et la dénitrification. Ainsi, l'étude des flux d'azote dans l'agrosystème est-elle étroitement liée à l'étude microbiologique de ces processus que nous n'aborderons pas dans notre étude mais pour lesquels nous ferons référence aux auteurs qui s'y sont consacrés.

Les méthodes quantitatives d'estimation des flux *in situ* se résument en trois types: les méthodes, qui consistent à comptabiliser l'azote dans les différents compartiments du système sur une période de plusieurs années, les méthodes isotopiques : valeur A" et "abondance naturelle", qui s'appliquent aux légumineuses et aux céréales, et les méthodes combinant les deux. C'est ainsi que nous distinguerons les bilans première, deuxième et troisième approche.

II.1 - Les approches du bilan de l'azote dans l'agrosystème

II.1.1 - Bilan sur plusieurs années (première approche).

Sur une période de t années, on mesure les paramètres suivants :

$$A = No + {}^{t}\Sigma_{o} \quad \text{(inputs connus d'azote)} \qquad (1)$$

$$B = Nt + {}^{t}\Sigma_{o} \quad \text{(outputs connus d'azote)}$$

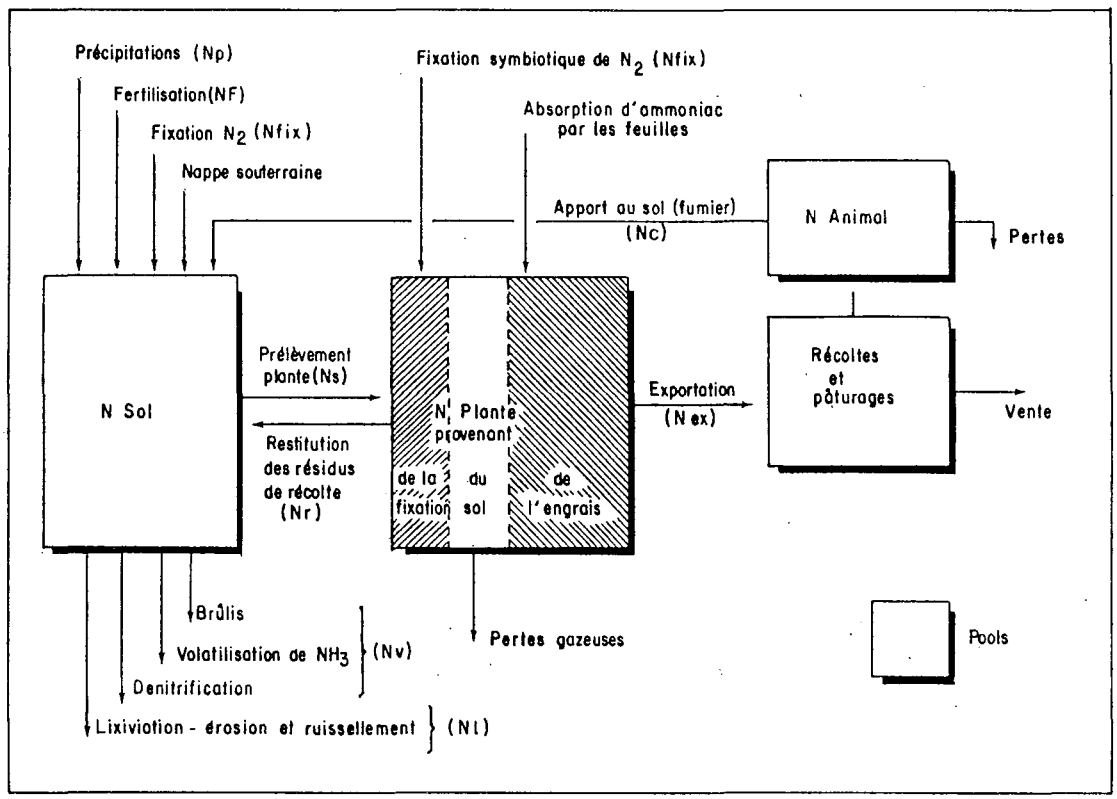


Figure 5 : Schéma montrant les deux principaux pools d'azote sol et plante, avec leurs inputs, outputs et transferts d'azote. D'aprés WETSELAAR et GANRY (1982).

No et Nt représentent l'azote du sol, constitué par l'azote organique contenu dans l'horizon agronomique (0-30 cm par exemple) et l'azote nitrique dans le profil (au moins jusqu'à 2 m) ; No représente l'azote du sol au départ (on pourrait prendre également l'azote du sol en jachère nue après t années mais avec le risque, dans ce sol, de pertes d'azote par lixiviation dues à l'absence de cultures) ; Nt représente l'azote du sol cultivé aprés t années.

Selon la figure 5, en considérant les inputs connus NF (engrais) et Nc (matière organique) et l'output connu Nex (exportations), les équations deviennent :

$$A = No + NF + Nc$$
$$B = Nt + Nex \qquad (2)$$

L'inégalité de A et de B permet d'établir si le système a été le siège de pertes (A > B) ou de gains d'azote (A < B).

De tels bilans permettent de faire ressortir les tendances à la dégradation ou à l'amélioration de la fertilité du sol, mais ne permettent pas la quantification des flux : Nv (pertes azote engrais), NFix (N_2 fixé par la légumineuse) et Ns (azote prélevé par la plante), essentiels dans une optique d'économie des engrais azotés en particulier et de l'azote en général.

II.1.2 - Bilan réel des différents flux d'azote (deuxième approche)

Lorsque les différents flux d'azote, inputs et outputs, peuvent être quantifiés, un bilan de l'azote peut être réalisé (HENZELL et VALLIS 1977, GREENLAND 1977, HEAL 1979, WETSELAAR et GANRY 1982, HERRIDGE 1987). Nous rappelons que les flux d'azote et les transferts d'azote par rapport aux deux principaux pools : le sol et la plante sont schématisés à la figure 5.

Inputs d'azote

NF = Engrais azoté
Nc = Azote de la matière organique compostée avec (fumier) ou sans (compost) les animaux.
NFix = Fixation symbiotique de N_2
Nfix = Fixation asymbiotique de N_2

Np = Azote des précipitations atmosphériques (poussières et pluies)

NSem = Azote des semences

$$\Sigma_{\circ}\ \text{Inputs} = NF + Nc + NFix + Nfix + Np + NSem \qquad (3)$$

Outputs d'azote

Nex = Exportation par les récoltes

Nl = Lixiviation, érosion et ruissellement

Nv = Volatilisation, dénitrification et brûlis

$$\Sigma_{\circ}\ \text{Outputs} = Nex + Nl + Nv \qquad (4)$$

$$\Delta N = \Sigma_{\circ}\ \text{Inputs} - \Sigma_{\circ}\ \text{Outputs} \qquad (5)$$

ΔN = Variation de l'azote total du sol dans le temps t

Deux remarques s'imposent :

- l'importance relative des flux d'azote est fonction du système de culture et de sa situation topographique ;

- il est impossible de mesurer tous les flux, des estimations sont alors nécessaires.

Dans les deux systèmes étudiés arachide-mil et soja-maïs, étant en situation de topographie plane, nous considérons que les pertes par érosion et ruissellement sont négligeables.

Nous donnons une application de l'équation 5 au chapitre VI tableaux 29, 30 et 31.

Lorsque le système de culture approche de son niveau d'équilibre, les inputs (essentiellement azote, phosphore et soufre) tendent à être compensés par les outputs (pertes et exportations).

A l'équilibre, l'équation 5 devient :

$$\Sigma_{\circ}\ \text{Inputs} = \Sigma_{\circ}\ \text{Outputs} \qquad (6)$$

$$\Delta N = 0$$

Par référence au modèle mathématique généralement utilisé (JENNY 1941, HENIN et DUPUIS 1945) exprimant la variation du taux d'humus (sens large) en fonction du temps, nous pouvons écrire, en évaluant cet humus par son azote total :

$$\frac{dN}{dt} = -k_2 N + H \qquad (7)$$

ou N = azote total de l'humus du sol (sens large),
H = apport annuel d'azote humique incluant le système racinaire implanté dans la couche considérée (il s'agit de la part des inputs allant au sol),
t = temps en année,
k_2 = fraction de l'azote total de l'humus (sens large) disparaissant chaque année,
N, H et k_2 se référant à une profondeur donnée.

Au niveau d'équilibre, la variation d'azote total du sol dans le temps est nulle :

$$\frac{dN}{dt} = 0 \Longrightarrow H = k_2 N \qquad (8)$$

Cette loi suppose que trois conditions soient préalablement remplies (GREENLAND et NYE 1959 cités par CHARREAU et TOURTE 1967) :

- il y a une formation continue d'humus dans le sol ;

- le taux de synthèse de l'humus est constant et indépendant de la teneur globale en humus du sol ;

- le taux de décomposition est variable et proportionnel au stock d'humus présent dans le sol dans la gamme de variations induite par le niveau de H.

En zone tropicale, l'ensemble du cycle de la matière organique est accéléré ; il en résulte que le niveau d'équilibre est atteint plus rapidement qu'en régions tempérées ; DOMMERGUES et MANGENOT (1970) admettent moins de 10 ans en zone intertropicale.

Nous donnons une application des équations 6 et 8 au paragraphe 6 du tableau 36A en annexe page 304.

II.1.3 - Bilan troisième approche : détermination des outputs inconnus

La combinaison des équations 2 et 5 prenant en compte l'ensemble des inputs et outputs permet d'égaler A et B :

$$A = No + {}^{t}\Sigma_{o} \text{ (inputs)}$$

$$B = Nt + {}^{t}\Sigma_{o} \text{ (outputs connus)} + {}^{t}\Sigma_{o} \text{ (outputs inconnus)}$$

$$A = B$$

A = B implique :

$${}^{t}\Sigma_{o} \text{ (outputs inconnus)} = No - Nt + \text{(inputs)} - {}^{t}\Sigma_{o} \text{ (outputs connus)} \qquad (9)$$

Dans ce cas, l'ensemble des inputs est mesuré pendant la période t, ainsi que le maximum des outputs; No et Nt sont mesurés comme nous l'avons indiqué au paragraphe II.1.1. page 49. L'output non mesuré est donc évalué par différence.

Si le système a atteint son niveau d'équilibre No = Nt ; compte tenu de l'équation 6, l'équation 9 devient :

$${}^{t}\Sigma_{o} \text{ (outputs inconnus)} = {}^{t}\Sigma_{o} \text{ (inputs)} - {}^{t}\Sigma_{o} \text{ (outputs connus)} \qquad (10)$$

Nous en donnerons une application au chapitre VI page 218.

II.2 - Bilan de l'engrais azoté dans le système sol-plante

Dans un système sol-plante recevant de l'engrais enrichi en ^{15}N, on a :

N total : quantité totale d'azote dans la plante.
NdfF = Azote de la plante provenant de l'engrais (Nitrogen derived from fertilizer)
E' = excès isotopique de la plante en %
NF = quantité d'azote de l'engrais apportée
E = excès isotopique de l'engrais en %

Le pourcentage d'azote de la plante provenant de l'engrais est égal à :

$$\% \text{ NdfF} = \frac{E'}{E} \times 100 \qquad (11)$$

Pour obtenir cette relation, on effectue le raisonnement suivant :

- si tout l'engrais était marqué, son excés isotopique E' serait donc de 100 et le % NdfF égal à E';
- en réalité seulement une fraction est marquée avec un excés isotopique de E, il en résulte un marquage 100 fois moins élevé, d'où :
E

$$\% \text{ NdfF} = E' \% \times \frac{100}{E}$$

$$\text{NdfF} = \% \text{ NdfF} \times \text{N total} = \frac{E'}{E} \times \text{N total} \times 100 \qquad (12)$$

Le coefficient réel d'utilisation est le pourcentage d'azote de la plante provenant de l'engrais par rapport à la quantité d'azote apportée par celui-ci :

$$\text{CRU } \% = \frac{\text{N total} \times E'}{NF \times E} \times 100 = \frac{\text{N total}}{NF} \times \text{NdfF } \% \qquad (13)$$

L'azote engrais retrouvé dans le sol (NiS %), se calcule de façon identique. La quantité d'azote total du sol est calculée horizon par horizon, d'où la nécessité de connaître la densité apparente du sol correspondant à chaque horizon.

La somme des pourcentages de l'azote engrais absorbé par la plante (CRU des parties aériennes) et immobilisé dans le volume de sol où il peut contribuer au maintien de la fertilité azotée du sol (NiSP) permet d'estimer quantitativement l'efficience réelle de l'engrais azoté.

Deux difficultés surgissent pour l'établissement de cette efficience réelle : la première est la mesure de la densité racinaire pour une profondeur donnée ; on possède cependant des résultats sur mil (CHOPART 1980) et sur maïs (CHARREAU 1971 ; GANRY 1987 non publié) qui autorisent des estimations. La deuxième est de connaître la capacité des systèmes racinaires à utiliser les éléments minéraux en profondeur, en particulier l'azote minéral.

En l'absence de données précises nous permettant d'apprécier la récupération de l'azote l'engrais immobilisé en fonction de la profondeur du sol, nous faisons l'hypothèse que l'azote engrais immobilisé dans l'horizon supérieur à forte densité racinaire (Nis) participe activement au cycle interne de l'azote et est facilement récupérable par les cultures suivantes.

Cet horizon dit "agronomique" est estimé à 0-40 cm pour le mil et 0-30 cm pour le maïs; dans l'horizon sous-jacent, nous admettons alors que l'azote engrais immobilisé est difficilement récupérable (NiS - Nis). Ces deux horizons constituent un horizon maximum qui correspond au volume de sol prospecté par l'ensemble du système racinaire où l'azote engrais immobilisé (NiS) ne sera que partiellement récupéré.

Dans l'horizon minimum, nous avons une estimation approchée par défaut de l'efficience réelle (CRU % + Nis %) ; l'estimation approchée par excès est celle représentée par le bilan de l'azote engrais dans le système sol-plante, égale à CRU % + NiS % dans l'ensemble du profil prospecté par les racines.

Cette approche du calcul de l'efficience réelle, ainsi que des pertes, est schématisée à la figure 6 que nous explicitons ci-après :

Efficience réelle de l'engrais = CRU % + NiS %

Cette efficience réelle étant impossible à mesurer directement, on écrit que sa valeur approchée est comprise entre deux valeurs mesurables :

CRU % + Nis % < Efficience réelle % < CRU % + NiS % (14)

Pertes d'engrais hors du système sol-plante = 100 - (CRU % + NiS)

Il s'agit de l'azote 15 perdu, non retrouvé analytiquement dans la plante et dans le sol, dont le manque est attribué aux pertes.

Ces pertes correspondent à l'azote 15 perdu en surface (érosion et ruissellement) et dans l'atmosphère ; elles sont donc, par différence. En raison de la topographie plane de nos essais, elles sont généralement attribuées aux pertes dans l'atmosphère par volatilisation et dénitrification. Lorsque l'urée est l'engrais utilisé, elles sont attribuées essentiellement à la volatilisation. On reviendra sur l'importance de la volatilisation au paragraphe IV.2.4. page 120.

Pertes d'engrais pour la culture = 100 - (CRU % + NiSP %)

Entendues au sens agronomique, ces pertes représentent l'azote 15 perdu pour la culture comprenant les pertes calculées ci-dessus, plus une quantité non mesurable correspondant à l'azote 15 immobilisé et lixivié dans le sol ne participant pas au cycle interne de l'azote.

Pertes (au sens agronomique) = 100 - efficience réelle (15)

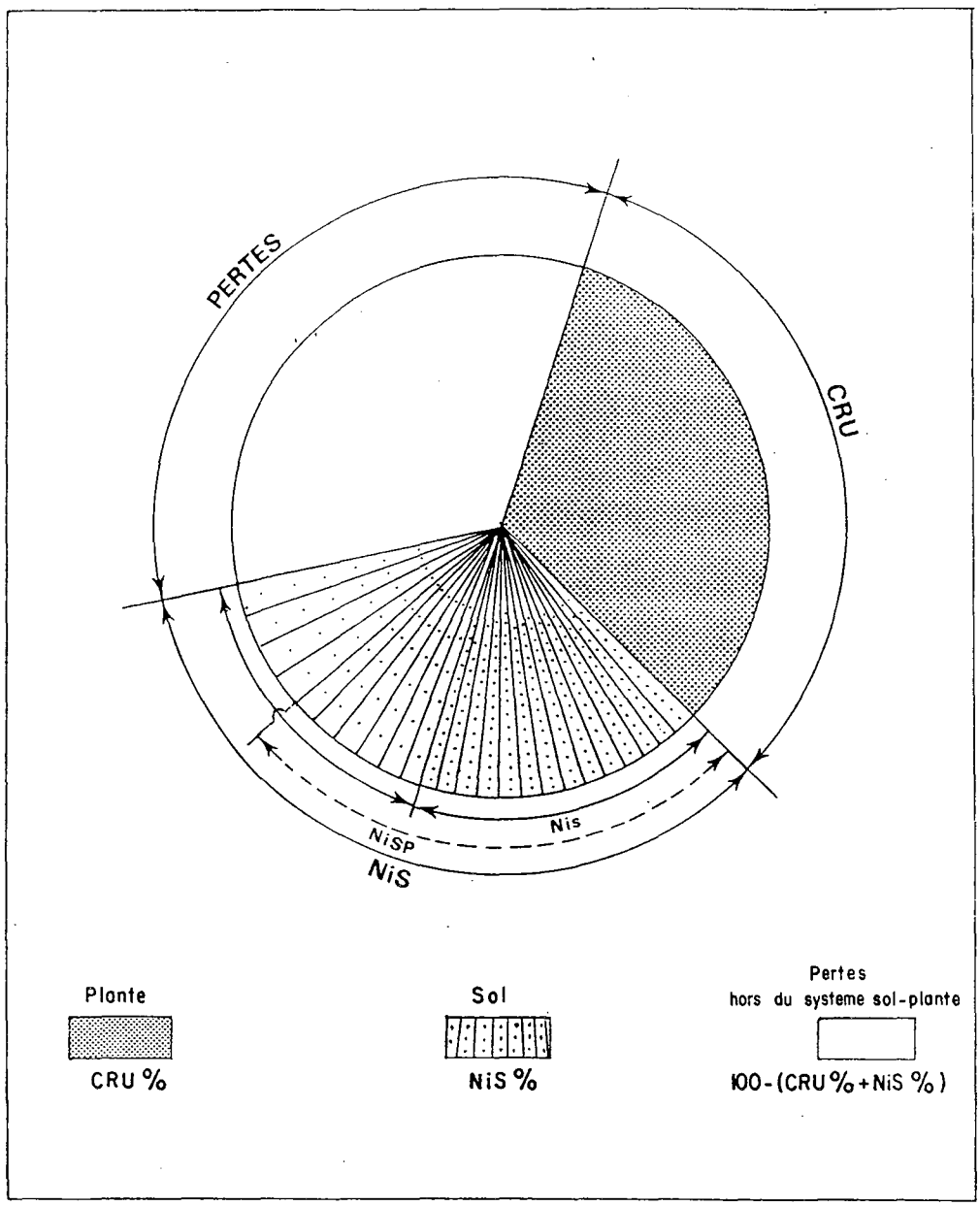


Figure 6 : Schéma d'interprétation du bilan de l'engrais azoté dans le système sol-plante.

CRU %	: azote 15 retrouvé analytiquement dans la plante (parties aériennes)
NiS %	: azote 15 retrouvé analytiquement dans le sol incluant les racines
Nis %	: azote 15 retrouvé analytiquement dans l'horizon de sol à forte densité racinaire (80 % du système racinaire), facilement récupérable par les cultures suivantes
NiSP %	: azote 15 du sol intervenant dans le cycle interne de l'azote et de ce fait pouvant contribuer au maintien de la fertilité azotée du sol. Estimé dans l'intervalle : Nis % $<$ NiSP % $<$ NiS %
NiS % - Nis %	: azote 15 retrouvé analytiquement dans le sol, difficilement récupérable par les cultures suivantes
PERTES %	: 100 - (CRU % + NiS %) : azote 15 "perdu", non retrouvé dans le système sol-plante, mesurable par différence

CHAPITRE III : TECHNIQUES ET METHODES

III.1 - Techniques Analytiques

III.1.1 - Définition

III.1.2 - Dosages chimiques

III.1.3 - Dosages isotopiques

III.2 - Méthodes isotopiques de quantification et d'interprétation

III.2.1 - Méthode isotopique de quantification du pool d'azote mobilisable du sol : concept de la valeur A

III.2.2 - Méthode isotopique de quantification *in situ* de la fixation de N_2

III.2.2.1 - L'engrais azoté est la source d'azote 15

III.2.2.2 - L'engrais azoté immobilisé dans le sol est la source d'azote 15

III.2.3 - Méthode isotopique d'évaluation d'un facteur du milieu, d'une variété ou d'une technique culturale sur le critère

III.2.3.1 - Céréales

III.2.3.2 - Légumineuses

III.3 - Erreurs analytique - Traitement statistique des résultats

Les techniques et la méthodologie isotopiques que nous utilisons sont celles développées et appliquées par l'école de Cadarache (C.E.A, G. GUIRAUD) et par l'école de Vienne (A.I.E.A, Pr. FRIED) celle-ci pour les méthodes de quantification de la fixation de N_2 et celle-là pour les techniques isotopiques de laboratoire (technologie et techniques isotopiques) et de terrain. La terminologie et les abréviations adoptées proviennent de ces deux écoles.

III.1 - Techniques analytiques

III.1.1 - Définitions (GUIRAUD 1984)

- **Teneur (ou abondance) et excès**

$$\text{Teneur en \%} = \frac{\text{nombre d'atomes } {}^{15}N \times 100}{\text{nombre d'atomes } {}^{14}N + {}^{15}N} = T\ \%$$

Teneur naturelle 0,366 % = T.N. %

Excès isotopique E % = T % - T.N. %

- **Dilution isotopique**

La méthode de la dilution isotopique ainsi que ses conditions de validité ont été récemment détaillées par GUIRAUD (1984). Nous les résumons ci-dessous.

Soit X la quantité d'azote à déterminer dans un système donné,

Q une quantité connue d'azote avec un excés isotopique connu E,

E' l'excès mesuré du mélange X + Q.

$$\text{On a : } Q \cdot E = (Q + X)\ E'$$

$$\text{d'où } X = Q \left(\frac{E}{E'} - 1\right)$$

Pour que cette formule soit valablement applicable, il faut :

- que X et Q soient sous la même forme chimique ;
- que le mélange X + Q soit homogène (d'où des difficultés avec les formes solides).

III.1.2 - Dosages chimiques

Le dosage de l'azote se fait par minéralisation Kjeldahl (incluant la réduction des nitrates), entraînement à la vapeur et dosage en retour après piégeage dans de l'acide en excès.

Pour éviter les pollutions, nous utilisons une unité d'entraînement "tout verre" et opérons un rincage abondant au méthanol entre les séries homogènes d'échantillons.

L'analyse du phosphore dans les plantes (essai XII) ainsi que toutes les analyses de sol ont été réalisées au laboratoire central d'analyse eau-sol-plante du Centre National de Recherches Agronomiques de Bambey (OLIVER 1975 et 1978 non publiés, NDIAYE et OLIVER 1982 non publié).

III.1.3 - Dosages isotopiques (GUIRAUD 1984)

Les dosages ont été réalisés hors du Sénégal dans des laboratoires spécialisés dont nous donnons la liste au tableau 2.

Le dosage isotopique se fait sur l'azote gazeux N_2 obtenu par deux procédés schématisés la figure 7 : (a) on transforme NH^+_4 en N_2 par réaction avec BrOLi dans un appareil de Rittenberg ou de Martin-Ross, (b) on transforme l'azote organique plante en N_2 par minéralisation DUMAS. La détermination de la teneur isotopique se fait avec un spectomètre de masse dont l'avantage essentiel est sa précision ; ses inconvénients sont : son coût, son entretien, son fonctionnement ainsi que la quantité d'azote nécessaire à la mesure (de l'ordre de 500 microgrammes pour un spectomètre classique).

Quant au spectomètre optique, GUIRAUD (1986, non publié) écrivait à son sujet : "ses principaux défaut sont sa moindre précision, surtout dans les faibles teneurs isotopiques, et le choix du verre servant à préparer les ampoules (qualité et géométrie). Par contre, le prix d'achat, la simplicité du fonctionnement, la faible maintenance et les quantités d'azote nécessaire (quelques microgrammes) sont des avantages certains pour cet appareil".

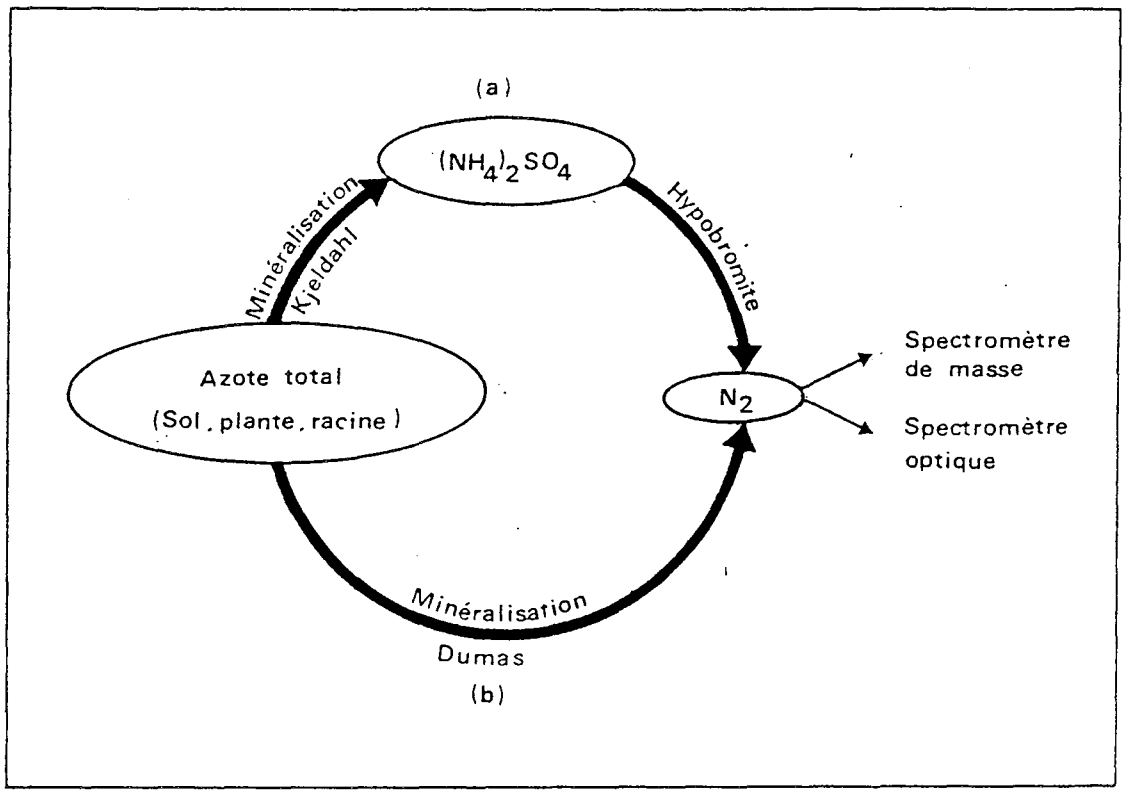


Figure 7 : Schéma montrant les deux méthodes de dosage de l'azote 15. D'aprés GUIRAUD (1984).

Tableau 2 : Modalités de réalisation des différents dosages isotopiques.

Essai	Lieu de réalisation du dosage	Scientifiques impliqués	Méthode de préparation de N_2 référenciée (a) ou (b) à la figure 5	Type de spectromètre
I	CIRAD de Montpellier (France)	M. LOZANO M. ROMERO	(a)	Masse
II à IV	CEN de Cadarache (France)	M. GUIRAUD	(a)	Masse
V à VII	Centre IFDC (U.S.A)	Dr. VLEK Dr. STUMPE	(a)	Masse
IX à XIV	AIEA de Vienne (Autriche)	Pr. FRIED Mlle AXMAN	(b)	Optique

A l'heure actuelle, des progrés notoires ont été réalisés ; notamment avec le modèle NOI-6 E fabriqué à Leipzig (R.D.A) acquis récemment par notre laboratoire de Bambey. Ces améliorations portent sur : (a) le temps de préparation et de mesure beaucoup plus rapide, (b) la précision du résultat surtout aux faibles teneurs (on dose facilement la teneur naturelle en ^{15}N de 0,366 %), (c) le fonctionnement (les échantillons liquides sont admis ; l'informatisation en bout de chaine permet l'affichage du résultat).

III.2 - Méthodes isotopiques de quantification et d'interprétation

III.2.1 - Méthode isotopique de quantification du pool d'azote du sol : concept de la valeur A (FRIED and DEAN 1952)

Ce concept repose sur l'hypothèse suivante : lorsqu'une plante est en présence de différentes sources d'azote, l'absorption à partir de chacune de ces sources est proportionnelle à la quantité disponible dans ces différentes sources, d'où l'équation de base :

$$\frac{N\ total}{N\ total\ disponible} = \frac{NdfF}{NF} = \frac{NdfS}{Asol}$$

où les termes :

N total disponible = NF + Asol,

NF = azote engrais apporté,

Asol = azote sol disponible (pool d'azote mobilisable),

représentent des sources d'azote et sont exprimés en équivalent engrais, par exemple en kg N ha^{-1} équivalent sulfate d'ammonium, si cet engrais est l'engrais utilisé pour la mesure .

La quantité d'azote disponible dans la source "sol" est désignée par A. Pour la détermination de cet azote, nous devons connaître :

- N total
- NdfF = N total x fNdfF
- NdfS = N total x fNdfS

où les termes :

fNdfF = fraction N provenant de l'engrais (fraction N derived from Fertilizer)
fNdfS = fraction N provenant du sol (fraction N derived from soil)
vérifient l'égalité suivante :

$$fNdfF + fNdfS = 1$$

Ces équations nous permettent d'écrire les deux relations suivantes :

$$\frac{fNdfF}{NF} = \frac{fNdfS}{Asol} = \frac{1 - fNdfF}{Asol} \qquad (16)$$

De l'équation 16, nous déduisons la valeur A du sol :

$$A\ sol = NF\left(\frac{1 - fNdfF}{fNdfF}\right)$$

Si E et E' sont respectivement les excès isotopiques de l'engrais et de la plante, compte tenu de l'équation 12, cette relation devient :

$$A\ sol = NF\left(\frac{E}{E'} - 1\right) \qquad (17)$$

Cette équation est de la même forme que l'équation de dilution isotopique établie à la page 58.

III.2.2 - Méthode isotopique de quantification *in situ* de la fixation de N_2 par la méthode isotopique.

Les méthodes de quantification de la fixation de N_2 par marquage à l'azote 15 *in situ* peuvent être classées en trois catégories selon l'origine de l'azote 15 : (a) la méthode fondée sur l'utilisation directe de l'engrais azoté, (b) la méthode fondée sur l'utilisation de l'engrais azoté immobilisé dans le sol par ajoût concomitant d'une source carbonée, (c) la méthode fondée sur l'utilisation de l'engrais azoté marqué résiduel, sous forme organique essentiellement, aprés une culture ayant reçu cet engrais marqué.

Une excellente étude comparative des avantages et inconvénients respectifs de ces différentes méthodes a été publiée par CHALK en 1985.

Nous avons appliqué la méthode (a) dans les essais VIII à XIV hormis l'essai X où nous avons appliqué la méthode (c). Nous présentons ci-dessous les méthodes (a) et (c).

III.2.2.1 - L'engrais azoté est la source d'azote 15 (FRIED and BROESHART 1975, FRIED and MIDDELBOE 1977)

Trois sources d'azote contribuent à l'alimentation azotée de la légumineuse :
- azote engrais apporté,
- azote sol fourni par le processus de minéralisation,
- azote fourni par le processus de fixation biologique de N_2.

- Conditions à ne pas enfreindre et hypothèses devant être admises

L'énumération exhaustive de ces conditions et hypothèses figurent au tableau 3, que nous résumons ci-dessous :

(1) la méthode de la valeur A requiert un traitement standard constitué d'une plante de référence non fixatrice, pour laquelle on doit émettre les deux hypothèses de base suivantes :

(2) la plante de référence absorbe l'azote sol et l'azote engrais dans le même rapport que la plante fixatrice, reflétant ou "voyant" le même pool azote sol (exprimé en unités d'azote engrais) présent dans le sol ;

(3) similitude entre plante fixatrice et plante de référence : la plante non fixatrice doit présenter une similitude avec la plante fixatrice étudiée, sur les trois paramètres suivants:

a) la longueur du cycle végétatif ;
b) le rythme d'absorption de l'azote en cours de cycle ;
c) la profondeur d'enracinement.

- Détermination de la valeur A fixation

La plante de référence permet de calculer la valeur A sol.
A partir de la plante fixatrice de N_2, l'équation 17 permet de calculer la valeur A (sol + fixation), de laquelle on tire les deux relations suivantes :

$$AFix = A(sol + Fix) - Asol$$

Tableau 3 - CONDITIONS A NE PAS ENFREINDRE POUR L'APPLICATION DE LA METHODE DE DILUTION ISOTOPIQUE (D'après WITTY, communication personnelle).

(1) EXCES ISOTOPIQUE PLANTE REFERENCE = EXCES ISOTOPIQUE SOL.

Vrai seulement si : - aucune discrimination entre ^{15}N et ^{14}N dans le sol ;
- la plante de référence ne fixe pas N_2 ;
- aucune discrimination isotopique dans le métabolisme azoté ;
- l'échantillonnage des différents organes est représentatif de la plante entière ;
- l'azote des semences est négligeable sinon en tenir compte.

(2) POOL N-SOL REFERENCE = POOL N-SOL LEGUMINEUSE

Vrai seulement si légumineuse et référence :
- ont la même longueur de cycle ;
- poussent dans le même sol ;
- "voient" le même pool N-sol, précisément,
  (a) ont le même profil racinaire,
  ou (b) la distribution ^{15}N dans le sol est entièrement la même,
  et (c) ont le même rythme d'absorption de l'azote,
  ou (d) l'excès isotopique du sol est stable dans le temps.

(3) LES LEGUMINEUSES ABSORBENT L'AZOTE DU SOL DANS LA MEME PROPORTION QUE L'AZOTE DE L'ENGRAIS

Vrai seulement si : - aucune discrimination entre ^{15}N et ^{14}N ;
- aucune discrimination entre les différentes formes d'azote
(ou - discrimination par la légumineuse et la référence identique)

(4) QUE LE PROCEDE DE MESURE N'AFFECTE PAS LUI-MEME LA FIXATION

Vrai seulement si : - l'azote engrais ajouté n'a pas d'effet ;
- la proximité référence-légumineuse n'a pas d'effet.

(5) QUE LA METHODE MESURE LA QUANTITE D'AZOTE FIXE

Vrai seulement si : - tout l'azote fixé se trouve dans la plante.

$$\frac{\%\ NdfF}{NF} = \frac{\%\ NdfFix}{AFix} = \frac{\%\ NdfS}{Asol} = \frac{\%\ NdfFix + \%\ NdfS}{AFix + Asol} \qquad (18)$$

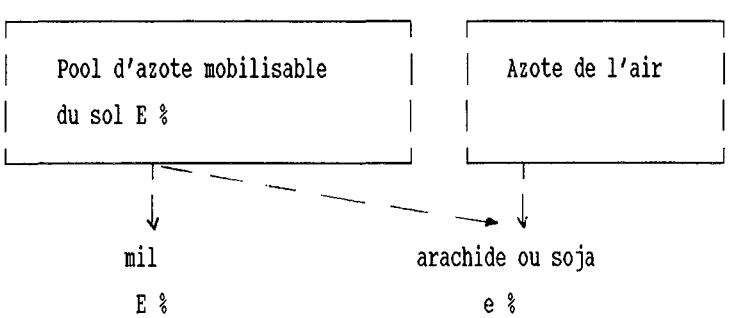
III.2.2.2 - La source d'azote 15 est l'engrais azoté marqué immobilisé dans le sol l'année précédente (FRIED *et al* 1983, CHALK 1985)

Le principe de la méthode est le même que précédemment mais le marquage à l'azote 15 de la plante est dû, non pas à l'engrais azoté mais à la matière organique du sol sens large qui a été préalablement marquée par un engrais azoté. Cette méthode est peu répandue, sans doute parce qu'elle requiert un lourd investissement en azote 15 l'année 1 pour n'en tirer profit qu'en année 2 ; elle est pourtant facile à mettre en oeuvre et de plus elle situe l'étude au niveau du système de culture. Comme dans la méthode précédente, les mêmes conditions et hypothèses demeurent et surtout l'obligation d'utiliser une plante de référence, que nous justifions ci-dessous :

- on conçoit, *a priori*, qu'une plante qui ne prélèverait son azote qu'à partir de la matière organique du sol - donc en absence d'engrais azoté et de fixation biologique et dans l'hypothèse d'un marquage uniforme de cette matière organique - présenterait un excès isotopique identique à celui de la matière organique du sol ;

- en réalité cette matière organique n'étant pas uniformément marquée, le pool d'azote mobilisable alimentant la plante, défini page 12, a un excès isotopique différent de la matière organique du sol et de plus décroissant dans le temps. On détermine alors l'excès isotopique moyen de ce pool d'azote mobilisable durant le cycle végétatif par la culture d'une plante non fixatrice (plante de référence) dont l'excès isotopique reflète, en absence d'engrais, celui dudit pool. Une source extérieure d'azote - fixation de N_2 en l'occurrence - entraine donc une diminution de cet excès isotopique, en d'autres termes une dilution isotopique dans le végétal (arachide ou soja dans nos essais).

On désigne les excès isotopiques par E % et e %



Dans ces conditions, le pourcentage d'azote de l'arachide ou du soja provenant du pool d'azote mobilisable du sol est :

$$\%\ NdfS = \frac{e \times 100}{E}$$

ce qui implique que le pourcentage de l'azote de l'arachide provenant de la fixation symbiotique est :

$$\%\ NdFix = \frac{100\ (E-e)}{E} \qquad (19)$$

III.2.3 - Méthode isotopique d'évaluation d'un facteur du milieu ou d'une technique culturale sur le critère de l'utilisation optimale de l'azote

Il s'agit de déterminer le degré de réalisation de la stratégie d'économie de l'azote présentée dans l'introduction page 23.

III.2.3.1 - Céréales

La mise au point d'une fumure azotée la plus économique possible dite "économe" (voir glossaire) nécessite d'une part l'accroissement de la fourniture d'azote par le sol, donc du pool d'azote mobilisable du sol évalué par la valeur A, et d'autre part l'accroissement de l'efficience réelle de l'azote engrais.

Pour satisfaire à ces deux conditions, les techniques culturales associées à la fertilisation azotée, devront tendre à :

(1) - réduire l'excès isotopique de la plante, ce qui révèlera l'accroissement de la valeur A du sol (voir équation 17 page 63),

(2) - accroître le NdfF et l'efficience réelle de l'engrais dans le système sol-plante , ce qui traduira la diminution des pertes d'azote engrais.

Les objectifs (1) et (2) peuvent apparaître incompatibles si l'on considère seulement la plante. En réalité, ils ne le sont pas ; en effet, d'après l'équation 11 on peut écrire :

$$NdfF = \frac{E'}{E} \times N\ total$$

D'après cette relation, on montre aisément que si le N total de la plante augmente de a % sous l'action d'une technique et que corrélativement l'excès isotopique de la plante (E') diminue de b % (objectif 1), le NdfF (objectif 2) augmentera si la relation suivante est satisfaite:

$$\frac{(100 + a)\ (100 - b)}{100^2} > 1$$

laquelle s'exprime sous une forme plus simple :

$$\frac{ab}{a - b} < 100 \text{ avec } a > b \qquad (20)$$

Nous en donnons une application au paragraphe IV.3.2 page 138.

En fait, il importe de considérer globalement l'efficience réelle de l'azote engrais dans la plante et dans le sol où celui-ci peut participer au cycle interne de l'azote et être récupéré par la plante.

III.2.3.2 - Légumineuses

Pour les légumineuses, l'objectif premier est de réduire la fourniture d'azote sol et engrais durant la phase où elles sont capables de fixer l'azote, ce qui signifie, en corollaire, accroître la fixation symbiotique de N_2 relative (% NdFix) donc agir dans le sens d'une réduction du rapport :

$$\frac{NdfF + NdfS}{N\ total} \qquad \text{(indice 1)}$$

Par ailleurs, l'exigence de maintenir la fertilité du sol commande de recycler les pailles directement ou indirectement via l'animal (figure 5). On utilisera donc de préférence des variétés pour lesquelles l'azote sol exporté (généralement l'azote sol dans les grains) soit au

moins compensé par le N_2 fixé dans les pailles restituées + la biomasse racinaire (condition 1). Ces paramètres n'étant pas mesurables, faisant abstraction de la biomasse racinaire, on applique la relation équivalente qui stipule que le N total des restitutions (Nr) soit supérieur ou égal au NdfS, ou encore que le N total exporté (Nex) soit inférieur au N_2 fixé (NdfFix), NdfS et NdfFix étant mesurable (condition 2). Cependant la biomasse racinaire n'est pas négligeable et nous pouvons en faire une estimation (voir tableau 37A en annexe). Enfin, nous admettrons que si la condition 2 est satisfaite au niveau de la plante récoltée, elle le sera *a fortiori* au niveau de la plante + biomasse racinaire. Ceci se résume dans l'équivalence suivante, la condition 1 équivalant à la condition 2 :

$$\underset{\text{paramètres non mesurables}}{\underbrace{\text{N}_2 \text{ fixé pailles} > \text{N-sol grains}}} \quad <=> \quad \underset{\text{paramètres mesurables}}{\underbrace{\text{N total paille} > \text{NdfS}}} \qquad \text{(indice 2)}$$

La méthode de la valeur A nous permet de calculer ces deux indices permettant donc l'évaluation d'un facteur de l'environnement, d'une variété ou d'une technique :

Indice 1 : *économie de l'azote ou potentiel fixateur*,
valeur calculée :

$$100 \times \frac{\text{NdfS} + \text{NdfF}}{\text{N total plante}} = 100 - \% \text{ NdfFix} \qquad (21)$$

Cette valeur devra être la plus petite possible.

Indice 2 : *maintien de la fertilité azotée*,
valeur calculée :

$$\text{N total paille} - \text{NdfS} \quad (\text{kg ha}^{-1}) \qquad (22)$$

Cette valeur devra être supérieure à zéro.

Elle s'annule lorsque le % NdfFix est égal à l'indice de rendement calculé sur la base du N total, ce qui se résume sous la forme de l'équivalence suivante :

N total paille - NdfS = 0 <=> % NdfFix = Indice de rendement

L'indice 1 s'applique à un ensemble de facteurs permettant ainsi d'effectuer leur classement (variétal par exemple) ; l'indice 2 peut s'appliquer à un seul facteur (une variété par exemple) permettant ainsi de le classer "bon" ou "mauvais" sur le critère examiné.

Une opération de choix variétal fondée sur ces deux indices nous ferait tendre vers la variété idéale :

- qui commence à fixer le plus tôt possible ;
- dont la fixation n'est pas inhibée par l'azote minéral du sol ;
- pour laquelle toute augmentation de rendement, donc toute demande supplémentaire en azote, soit satisfaite par la fixation de N_2 et non par le sol et/ou l'engrais azoté ;
- dont la production en protides grains se fasse le moins possible au détriment de l'azote du sol.

Des applications seront données tout au long du chapitre V.

III. 3 - Erreurs analytiques - Traitement statistique des résultats

L'utilisation du traceur azote 15 dans les systèmes sol-plante permet d'atteindre une trés bonne précision du résultat de teneur en azote engrais dans l'échantillon, donc de précision du NdfF %. Comme le souligne GUIRAUD (1984), avec seulement trois répétitions, les coefficients de variation des résultats du dosage d'azote total dans les sols et les végétaux par la méthode kjeldahl se situent aux alentours de 2 à 3 % ; ceux des dosages isotopiques sont encore plus petits. Il en résulte que **la principale source d'erreur proviendra de la variabilité des essais agronomiques : variabilité spatiale et erreur expérimentale.**

Nous avons essayé d'appréhender la variabilité spatiale au niveau de l'essai au champ IV en ce qui concerne le CRU %, le NiS % et les pertes d'azote engrais hors du système sol-plante égales à 100 - CRU % - NiS %.

L'erreur expérimentale est estimée par l'analyse de la variance. Les dispositifs expérimentaux sont de type blocs aléatoires complets avec parcelles divisées ("split-plot") ou sans parcelles divisées. Le nombre de répétitions est : de 5 (essais I, IX, X, XIII), de 6 (essais II, III, IV à VII, VIII, XI, XII), ou de 8 (essai XIV) ; l'essai en lysimètre X est entièrement randomisé et comporte 5 répétitions.

L'interprétation statistique de l'ensemble des essais est réalisée selon QUIDET et MASMEJEAN (1962), LECOMPT (1965) et DAGNELIE (1973 et 1975). La probabilité de l'hypothèse est P = 0,05. Pour les essais Blocs la significativité est mesurée par le test de Newman - Keuls ou de la ppds. Pour les essais en Blocs avec parcelles divisées ("split-plot"), on applique le test de la ppds ; si l'interaction entre traitements principaux et sous-traitements n'est pas significative, on conclut que les sous-traitements ont le même effet, quel que soit le traitement principal ; si l'interaction est significative, dans ce cas, on poursuit l'interprétation selon la méthode développée par QUIDET et MASMEJEAN (1962). Les fonctions de production ont été calculées avec le logiciel MSTAT version 4, mis au point par le MSTAT Developpement team Michigan State University et par l'Agricultural University of Norway.

Interprétations statistiques des valeurs NdfFix

Ces valeurs, comme nous l'avons vu au paragraphe III.2.2.1 pages 65 et 66, résultent de la différence entre deux valeurs A (équation 18), ou entre deux excès isotopiques (équation 19), chacune des valeurs étant obtenue sur des parcelles de référence dites "non nod." permettant le calcul de la valeur A "sol" et des parcelles comportant la légumineuse fixatrice dite "nod.". La randomisation de l'ensemble de ces parcelles, appliquée aux premiers essais réalisés (essais IX et XIII) au début de nos travaux, ne nous autorise pas à effectuer la différence [valeur A "nod."] - [valeur A "non nod."] par parcelle mais seulement une différence [valeur A "nod." moyenne] - [valeur A "non nod." moyenne]. Pour les besoins de l'interprétation statistique, on soustrait de chaque valeur A "nod." parcellaire, la valeur A "non nod." moyenne.

Ce procédé, nous le reconnaissons est moins rigoureux au plan statistique que celui qui consisterait à soustraire deux valeurs A issues du même micro-site. Nous ne pouvons effectuer cette différence en raison de l'éloignement possible entre parcelles et en conséquence, de la variabilité spatiale (que nous essayons d'appréhender au paragraphe IV.2.2). C'est la raison pour laquelle, nos dispositifs expérimentaux, par la suite, ont été améliorés afin de rendre contiguës parcelles "nod." et parcelles "non nod." (essais VIII, XI, XII et XIV), nous autorisant alors à soustraire les deux valeurs A obtenues dans un même micro-site.

CHAPITRE IV - OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE L'AZOTE DES ENGRAIS ET DU SOL DANS LES SYSTEMES SOL-PLANTE NON FIXATEURS DE N_2

IV.1 - Les dispositifs expérimentaux

IV.1.1. Essai au champ I
IV.1.2. Essai au champ II
IV.1.3. Essai au champ III
IV.1.4. Essai au champ IV
IV.1.5. Essais au champ V, VI et VII

IV.2 - Disponibilité et utilisation de l'azote provenant du sol et de l'engrais
IV.2.1 - Disponibilité de l'azote sous cultures de mil et de maïs. Essais au champ I à VII
IV.2.1.1. Rendement, productivité et rentabilité de l'engrais
IV.2.1.2. Coefficient réel d'utilisation de l'engrais
IV.2.1.3. Immobilisation de l'engrais
IV.2.1.4. Efficience de l'engrais
IV.2.1.5. Fourniture d'azote par le sol
IV.2.1.6. Conclusion

IV.2.2 - Variabilité spatiale. Essai au champ IV
IV.2.2.1. Coefficient réel d'utilisation de l'engrais
IV.2.2.2. Immobilisation de l'engrais
IV.2.2.3. Efficience de l'engrais
IV.2.2.4. Fourniture d'azote par le sol
IV.2.2.5. Conclusion

IV.2.3 - Lixiviation de l'engrais. Essai au champ III
IV.2.3.1. Lixiviation en cours de cycle et utilisation de l'engrais par la plante
IV.2.3.2. Profondeur de lixiviation de l'engrais
IV.2.3.3. Conclusion

IV.2.4 - Volatilisation de l'engrais. Essai en milieu contrôlé

IV.2.4.1. Facteur sol

IV.2.4.2. Facteur placement

IV.2.4.3. Facteur dose

IV.2.4.4. Conclusion

IV.3. Optimisation de l'utilisation de l'azote

IV.3.1. L'enfouissement de paille est-il bénéfique ? Essai au champ II

IV.3.2. Le compostage de la paille améliore-t-il l'efficience de l'azote ? Essai au champ II

IV.3.3. L'effet du compost est-il accru par les applications répétées ? Essai au champ I

IV.3.4. Optimisation de la technique de placement de l'engrais. Essais au champ V, VI et VII

IV.3.4.1. Rendement

IV.3.4.2. Coefficient réel d'utilisation de l'engrais

IV.3.4.3. Immobilisation de l'engrais

IV.3.4.4. Efficience de l'engrais

IV.3.4.5. Valeur A et efficience relative de l'engrais

IV.3.4.6. Conclusion

IV.4. Conclusion générale du chapitre IV

IV.1 - LES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Sept essais au champ numérotés de I à VII ont été réalisés ; leur situation géographique, environnementale et culturale est résumée au tableau 4.

IV.1.1 - Essai au champ I

Un essai pluriannuel, dont le but est d'étudier la fertilisation azotée du mil en présence ou en absence de compost, a été mis en place en 1971 à Bambey (voir tableau 4). Les traitements de cet essai sont les suivants : 0, 30, 60, 90, 120, 150, kg N ha^{-1} an^{-1} en présence ou en absence de compost de paille de mil à la dose de 10 t M.S ha^{-1} an^{-1} dont les teneurs en carbone et azote sont en moyenne de C = 27 %, N = 1,25 %. La technique de fabrication du compost, inspirée de celle décrite par GROS (1974) pour la fabrication du fumier artificiel a été adaptée à la zone tropicale sèche (GANRY non publié) ; elle est décrite par MUSTIN (1988) dans son ouvrage sur le compost. L'essai comprend des parcelles élémentaires de 6 x 9 m disposées en blocs subdivisés ("split-plot"), avec six répétitions. La fumure minérale P, K et S est apportée en quantité suffisante pour satisfaire les besoins du mil (30 P_2O_5, 40 K_2O et 20 S). L'azote, sous forme d'urée, est apporté en trois fois au cours du cycle : 1/5 au semis, 2/5 au démariage (10-16ème jour) et 2/5 au début de l'épiaison.

L'essai au champ I est implanté dans l'essai pluriannuel ci-dessus en apportant de l'engrais marqué aux doses 30 et 90 kg N ha^{-1}. Son but, après quatre années de culture continue de mil, est d'étudier l'effet cumulatif du compost et de l'urée apportée à deux doses: à une dose faible de 30 N et à une dose forte de 90 N, avec cinq répétitions (Bloc I supprimé car influencé par la proximité d'une rangée d'arbres). Cinq prélèvements sont effectués en cours de cycle aux stades démariage, montaison, épiaison, floraison et maturité. Les figures 14 Aa et 14 Ab en annexe montrent la disposition des différentes parcelles de prélèvements et de rendement. La figure 1 A en annexe permet de situer ces prélèvements dans le cycle cultural par rapport aux pluies et aux apports d'urée. Les quantités d'azote apportées figurent dans le tableau 5.

Pour les différents prélèvements, les analyses d'azote sont réalisées sur les organes suivants : [plante entière] aux stades démariage, montaison et épiaison ; [épi] et [tige + feuille] au stade floraison ; [grain], [rachis + glumes] et [tige + feuille] au stade maturité.

Les prélèvements de sols sont réalisés à la tarière dans les horizons 0-20 cm, 20-40cm, 40-80 cm et 80-120 cm, dans la sous-parcelle "maturité" (cinq prélèvements sont réalisés puis homogénéisés ; un échantillon moyen est ensuite constitué sur lequel portent les analyses). Les densités apparentes prises en compte sont d = 1.5 pour 0-20 cm et d = 1.6 pour 20-120 cm.

Tableau 4 : Situation géographique, environnementale et culturale des différents essais réalisés au champ sur céréales.

Numéro	Dénomination	Localité	Type de sol (1)	Variété cultivée (2)	Précédent cultural	Année de réalisation	Pluviométrie
I	Essai inclus dans un essai pluriannuel "azote x compost" mis en place en 1971	Bambey	Ferrugineux tropical peu lessivé type "dior"	Mil Syn. 1	Jachère de quatre ans avant l'essai pluriannuel	1975	570 mm
II	Essai "paille x compost"	Bambey	idem essai I	Mil Syn. 1	Rotation arachide mil	1977	404 mm
III	Essai coordonné AIEA "Economie de l'eau et des éléments minéraux"	Bambey	idem essai I	Mil Souna III	Rotation arachide céréale	1980	387 mm
IV	Essai "efficience de l'urée sur maïs"	Nioro	Rouge ferrugineux tropical lessivé sur gré sablo-argileux	Maïs B.D.S	Rotation arachide	1978	760 mm
V	Essai "efficience de l'urée sur maïs	Séfa	Ferrugineux tropical lessivé à tâches et concrétions type "beige"	Maïs ZM-10	Jachère pluriannuelle	1983	771 mm
VI	Essai "efficience de l'urée sur maïs"	Séfa	idem essai V	Maïs B.D.S	Rotation arachide céréale	1984	980 mm
VII	Essai "efficience de l'urée sur maïs"	Séfa	idem essai V	Maïs B.D.S	Fréquence élevée de la céréale dans la rotation	1985	846 mm

(1) pour une plus ample information voir tableau 1

(2) - le mil var. syn. 1 est une population synthétique d'un mil à structure plus céréalière que le mil souna et de cycle plus court (75 jours semis-récolte au lieu de 90 jours pour le souna) ;
- le mil var. Souna III est une variété qui a fait largement ses preuves en milieu paysan mais son cycle de 90 jours est souvent trop long pour les conditions climatiques du Nord. Malheureusement, le Souna III, résultat du croisement de huit lignées, vient d'être de nouveau perdu ;
- le maïs var. BDS est un hybride double qui a fait ses preuves depuis plusieurs années et donne de bons résultats en culture intensive. Malheureusement, la perte d'un des géniteurs bloque le processus de multiplication. Pour la fabrication du "riz de maïs", cette variété donne les meilleurs résultats. Il est cependant douteux que l'utilisation d'un hybride double soit justifiée dans les conditions du Sénégal, vu le coût élevé de multiplication des semences ;
- le maïs var. ZM-10 est une population de Casamance dont les qualités de rusticité permettent de la recommander en systèmes de culture à faible intensification.

Tableau 5 : Quantités d'azote engrais et d'azote 15 apportées en cours de cycle. Bambey, essai I.

		N-engrais[1] apporté kg ha^{-1}				
		Germination[2] N_1	Démariage N_2	$N_1 + N_2$	Montaison N_3	$N_1 + N_2 + N_3$
30 N	N-engrais	5.89	11.78	17.67	11.79	29.5
	^{15}N-engrais	0.189	0.378	0.567	0.378	0.945
90 N	N-engrais	17.69	35.37	53.06	35.37	88.4
	^{15}N-engrais	0.567	1.134	1.701	1.134	2.835

(1) urée avec excès isotopique E % = 3,21

(2) apport engrais à la première pluie utile (le semis est fait en sol sec).

IV.1.2 - Essai au champ II

Le but de l'essai au champ II est d'étudier comparativement sur le même type de sol et pour la même variété de mil que dans l'essai I (tableau 4) les effets directs de la paille et du compost provenant de cette même paille, enfouis par labour en fin de cycle de l'année précédente. Les doses apportées sont de 10 t M.S ha^{-1} de paille (C% = 46 ; N% = 1,04) et de 8 t M.S ha^{-1} de compost (C% = 21 ; N% = 1,23). Les trois traitements, témoin, "paille" et "compost" reçoivent la fumure minérale P, K et S en quantité suffisante pour satisfaire les besoins du mil (30 P_2O_5, 40 K_2O et 20 S). L'azote urée est apporté pour moitié après le démariage et pour moitié en fin de montaison à raison de 90 kg N ha^{-1}. La figure 2 A en annexe situe ces apports d'azote dans le cycle cultural par rapport aux pluies.

L'étude azote 15 rapportée ici concerne l'essai total mis en place à cet effet. L'essai comprend des parcelles de 50 m^2 disposées en blocs avec six répétitions. L'écartement du mil est de 15 cm x 45 cm. La parcelle azote 15 incluse dans la parcelle principale a une surface de 2,63 m^2 et la sous-parcelle azote 15 récoltée, de 0,54 m^2, représentant huit pieds de mil (figure 15 A en annexe). A la récolte, on élimine une ligne dans le sens de la longueur et trois lignes dans le sens de la largeur.

IV.1.3 - Essai au champ III

Le but de l'essai au champ III est de suivre la lixiviation de l'azote engrais, marqué à l'azote 15, en cours de cycle sous culture de mil souna III. La méthode repose sur l'analyse du traceur azote 15 dans la solution du sol prélevée à différentes profondeurs à l'aide de capteurs de solution (PIERI 1979) installés dans les parcelles ayant reçu l'azote 15 : la présence de traceur dans la solution du sol traduit la présence de l'azote engrais à la profondeur prélevée. Le dispositif expérimental est constitué par six parcelles traitées de façon identique. La fumure minérale P,K et S apportée est la même que pour les essais I et II. L'azote est apporté sous forme de sulfate d'ammonium à la dose de 60 N. La parcelle azote 15, incluse dans la parcelle principale, a une surface de 9,72 m^2 et la parcelle azote 15 récoltée, de 4,86 m^2, représentant six pieds de mil, qui encadrent les capteurs de solution (figure 15 A en annexe). La figure 3 A en annexe situe les différents prélèvements de solution du sol en fonction des pluies et des apports d'engrais azoté dans le cycle cultural.

IV.1.4 - Essai au champ IV

Le but de l'essai au champ IV est double : (a) étudier l'efficience de l'urée sur maïs, (b) marquer suffisamment le sol avec l'azote 15 afin de pouvoir quantifier la fixation de N_2 sur

le soja suivant le maïs. L'étude sur le soja n'est pas relatée dans le présent mémoire.

L'essai est implanté à la station de Nioro (carte figure 1 page 29) dont l'isohyète actuel est de 600 mm (figure 2 page 30).

Nous présentons ici les résultats de la première étude. Le dispositif expérimental est constitué de 42 parcelles principales d'une surface de 36 m^2 disposées en six blocs (essai Blocs aléatoires) traitées de façon identique. La fumure minérale P, K et S apportée est suffisante pour satisfaire les besoins du maïs (35 P_2O_5, 85 K_2O, 20 S). L'azote est apporté à la dose de 100 kg N ha^{-1} en surface à raison de 1/5 au semis, 2/5 au 25ème jour et 2/5 au 45ème jour. La figure 4 A en annexe situe ces apports d'azote dans le cycle cultural par rapport aux pluies. L'écartement du maïs est de 25 x 90 cm. La parcelle azote 15 incluse dans la parcelle principale a une surface de 3,6 m^2 et sous la parcelle azote 15 récoltée de 1,12m^2 représentant cinq pieds de maïs (figure 16 A en annexe page 326). On récolte les pieds de maïs conformément aux indications de la figure 16 A en annexe.

Les analyses d'azote sur la plante ont été réalisées séparément sur les [grains], [rachis + spathes], [tiges + feuilles].

Les prélèvements de sol sont réalisés de la même façon que dans l'essai I (page 77).

Les résultats relatifs au bilan azote 15 dans le système sol-plante, en raison de leur grand nombre (42 répétitions) sont présentés sous forme d'histogramme (figures 17, 18, et 19).

IV.1.5 - Essai au champ V, VI, et VII

Le but de ces essais est double : (a) étudier la fonction de production du maïs à partir des courbes de réponse à l'engrais azoté, (b) étudier l'efficience de l'urée comme définie au paragraphe II.2 page 52.

Ces essais ont été réalisés dans le cadre d'un programme de recherche en coopération avec l'IFDC*, échelonné sur trois ans de 1983 à 1985, mis en oeuvre dans le sud du Sénégal à la station de Séfa. Trois sites différents ont été étudiés (un site par année).

---

* Centre International pour le Développement des Engrais, Alabama, U.S.A.

On étudie d'une part, la réponse du maïs à l'urée (0, 50, 100 et 150 kg N ha^{-1}) apportée selon deux techniques en 1983 et trois techniques en 1984 et 1985 ; d'autre part, pour la dose d'azote *a priori* optimale (100 N), on mesure le bilan de l'azote engrais dans le système sol-plante par le moyen de l'application d'urée enrichie en azote 15. Les figures 5 A, 6 A et 7 A en annexe situent ces apports d'azote dans le cycle pluviométrique et cultural.

Les trois techniques d'application sont les suivantes :

- **"Surface" (Broadcast)**. L'urée granulée est apportée en surface puis mélangée superficiellement au sol : après l'apport au semis (15 %), deux apports en cours de cycle sont effectués, l'un au 18ème jour et l'autre au 27ème jour (42,5 % et 42,5 %), l'apport au 27ème jour étant suivi du buttage ;

- **"Localisé en bande" (Banded)**. L'urée granulée est apportée en bande à 10 cm de la ligne de maïs puis incorporée à 5 cm de profondeur : après l'apport au semis (15 %), un seul apport en cours de cycle est effectué, au moment du buttage au 27ème jour (85 %) ;

- **"Localisé en poquet" (Point Placed)**. L'urée est conditionnée sous forme de supergranules de forme sphérique d'un poids unitaire variant de 0,37 à 4,17 g, et apportée à raison de un ou deux supergranules par pied selon la dose et l'époque et à 5 cm de profondeur : après l'apport au semis (15 %), un seul apport en cours de cycle est effectué, au moment du buttage (85 %).

La fumure minérale est identique à celle de l'essai IV à Nioro (page). L'écartement du maïs est de 25 x 90 cm.

Le dispositif expérimental est de type Blocs aléatoires (six répétitions). La parcelle azote 15 (2 x 3,6 m) est incluse dans la parcelle principale (9 x 5,4 m) (figure 16 A en annexe).

La récolte des parcelles azote 15 porte sur les quatre pieds centraux et les quatre pieds adjacents aux pieds centraux, les deux récoltes étant analysées séparément. Seuls les résultats relatifs aux pieds centraux sont examinés ici.

Les analyses d'azote sur la plante ont été réalisées séparément sur les [grains], [feuilles + spathes], [tiges] et [rachis].

Les prélèvements de sol sont réalisés de façon différente à ceux des expérimentations I et IV dans le but d'améliorer l'échantillonnage. La technique consiste à enlever tout le sol des

Les prélèvements de sol sont réalisés de façon différente de ceux des expérimentations I et IV dans le but d'améliorer l'échantillonnage. La technique consiste à enlever tout le sol des horizons 0-15 cm et 15-30 cm de la parcelle centrale de dimension 0,5 x 1,8 m, puis de prélever à la tarière cinq carottes de sol dans chacun des horizons 30-60, 60-90, 90-120 et 120-150 cm. Un échantillon représentatif est constitué par horizon : de 3 à 4 kg pour les deux premiers horizons, de 500 g pour les horizons suivants. Un échantillon de sol non marqué à l'azote 15 est prélevé sur une parcelle non fertilisée dans les horizons 0-15 et 15-30 cm, avant les prélèvements sur parcelle azote 15. Les densités apparentes sont mesurées pour chaque horizon dans l'essai V : pour les horizons 0-15, 15-30, 30-60, 60-90, 90-120 et 120-150 cm, elles sont, pour les trois premiers horizons de 1,53 (0-60 cm), et de 1,40, 1,42 et 1,40 pour les horizons suivants.

IV.2 - DISPONIBILITE ET UTILISATION DE L'AZOTE PROVENANT DU SOL ET DE L'ENGRAIS

IV.2.1. Disponibilité de l'azote sous cultures de mil et de maïs.
Essai au champ I à VII

L'étude de la disponibilité et de l'utilisation de l'azote pour et par les céréales repose sur l'analyse du système sol-plante selon trois approches :

a) une approche "économie" qui permet de connaître d'une part la productivité de l'unité d'azote engrais (donc une efficacité apparente) et d'autre part de connaître jusqu'à quel niveau on peut augmenter la dose azote engrais dans un contexte économique donné ; ce niveau est représenté par la dose optimale et constitue la limite maximum de l'input azote engrais qu'on puisse admettre. C'est une donnée importante que nous utiliserons ci-après dans le chapitre VI ;

(b) une approche "physiologie végétale" qui permet de connaître l'efficacité des plantes en ce qui concerne l'utilisation de l'azote (CRU %, % NdfF et % NdfS) ;

(c) une approche "bilan d'azote" qui permet d'évaluer l'efficience réelle de l'azote engrais dans le système sol-plante (selon la figure 6 page 55).

IV.2.1.1 - Etude économique de la fonction de production :
rendement, productivité et rentabilité de l'engrais

Les résultats de rendement du mil et de rentabilité de l'engrais sont schématisés à la figure 8 courbe A. La réponse du mil aux doses croissantes d'urée met en évidence un rendement maximum de 18 q grain M.S ha^{-1} correspondant à la dose de 126 N. Aux doses de 30 N et 90 N, qui sont celles marquées à l'azote 15, la productivité de l'unité d'azote est respectivement de 19 et 14. En ce qui concerne la rentabilité de l'engrais à une dose d'azote donnée, la valeur ajoutée enregistrée est représentée par le segment de droite, exprimée en kg grain ha^{-1}, compris entre la courbe de réponse et la droite d'équation Y = kx ; ces droites représentent le lieu des points d'équivalence monétaire "apport d'azote" et "rendement" dans un système des prix tel que :

$$k = \frac{\text{coût urée}}{\text{prix du mil}}$$

Deux valeurs de k sont arbitrairement choisies, l'une correspondant à un contexte économique favorable (k = 2,5) et l'autre défavorable (k = 7). La dose 88 N est l'optimum

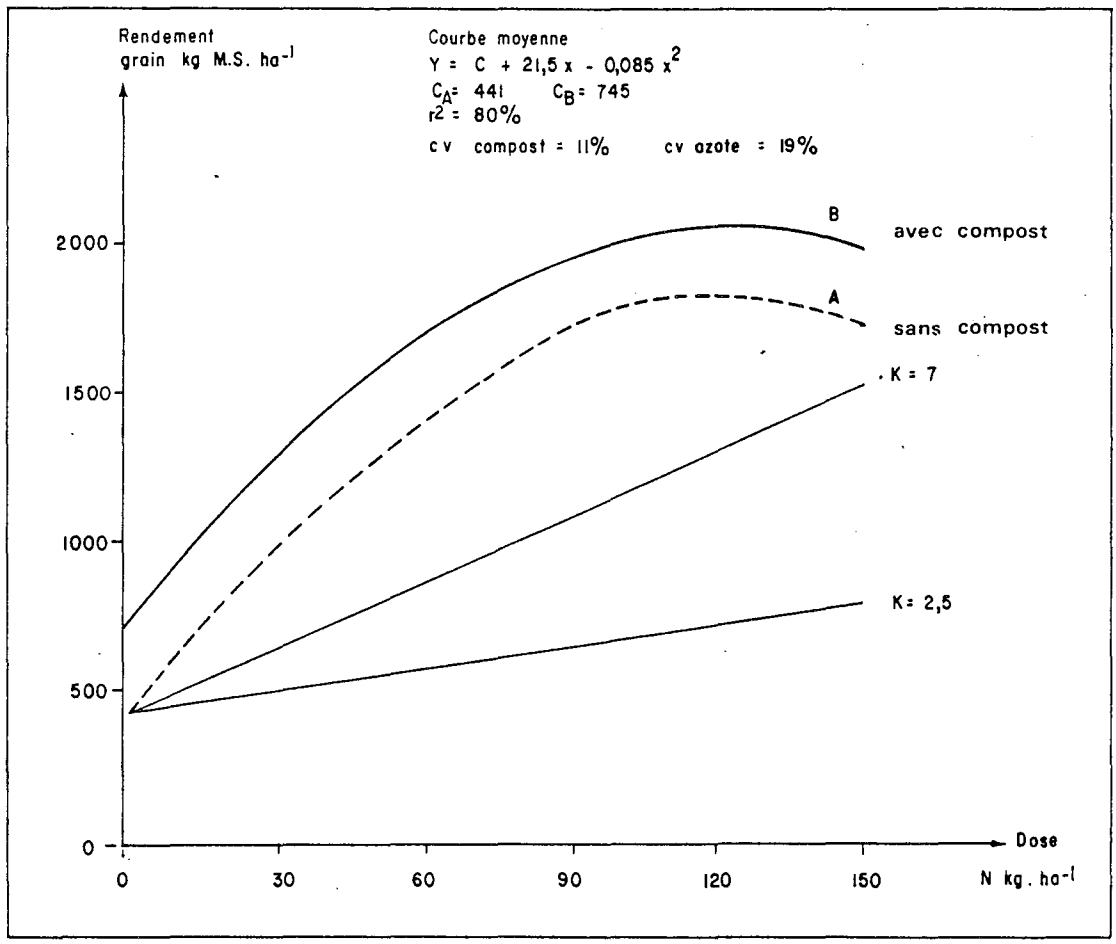


Figure 8 : Réponse du mil exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote. A : sans compost ; B : avec compost. Essai au champ I. Les rendements sont ceux obtenus dans la "parcelle de rendement grain et paille" (figure 14 Aa en annexe).

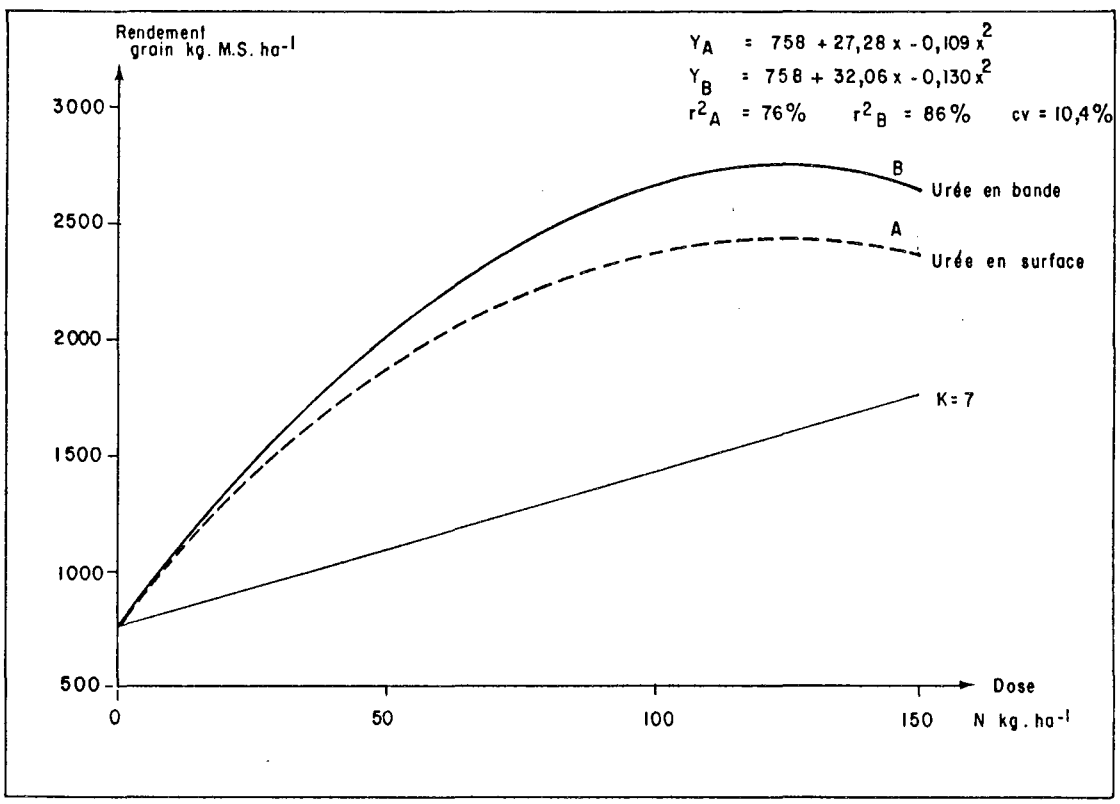


Figure 9 : Réponse du maïs exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote. A : urée en surface ; B : urée en bande. Essai au champ V.

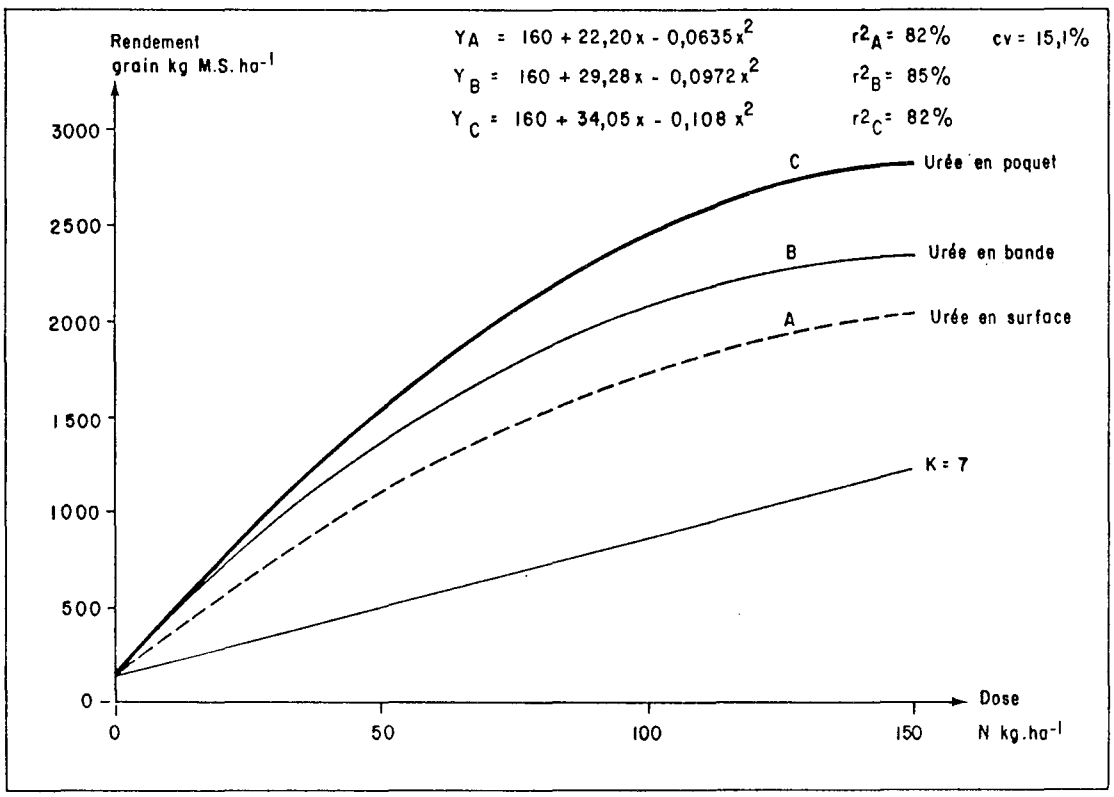


Figure 10 : Réponse du maïs exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote. A : urée en surface ; B : urée en bande ; C : urée en poquet. Essai au champVI .

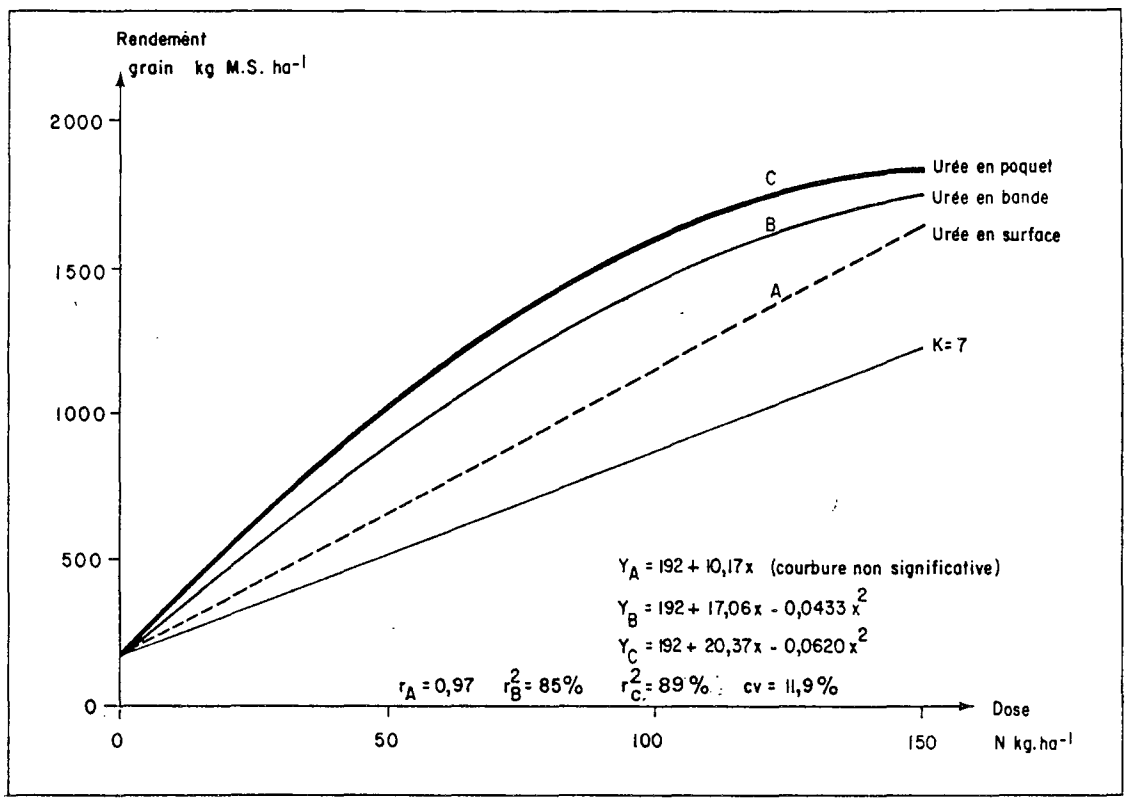


Figure 11 : Réponse du maïs exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote - Essai au champ VII.

économique pour k = 7, procurant un rendement grain de 17 q M.S ha^{-1}.

Les résultats de rendement du maïs et de rentabilité de l'engrais sont schématisés aux figures 9, 10 et 11 courbe A. Les équations des courbes de réponse du maïs aux doses croissantes d'urée permettent la mesure, sur trois années, des variables relatives au rendement, à la productivité et à la rentabilité de l'azote ; en prenant les deux extrêmes des trois valeurs mesurées sur trois années, nous dégageons un intervalle qui traduit mieux que la moyenne, la variabilité spatio-temporelle. On obtient ainsi :

21 < Rendement maximum q M.S grain ha^{-1} < 25	m = 23
124 < Dose maximum kg N ha^{-1} < 197	m = 165
10 < Productivité de l'unité d'azote à 30 N < 31	m = 23
10 < Productivité de l'unité d'azote à 100 N < 23	m = 17
73 < Dose optimale kg N ha^{-1} pour K = 7 < 120	m = 110

En ce qui concerne la fonction de production du traitement engrais en "surface" de l'essai VII, l'hypothèse d'une parabole étant rejetée et celle d'une droite retenue dans l'intervalle [0,150 N] (tableau 19 page 148), nous admettons les doses maximum et optimum (que la droite ne permet pas d'obtenir) obtenues dans le traitement "bande" à savoir 197 N et 115 N respectivement, considèrées alors être une estimation approchée par défaut pour le traitement urée en surface ; cette approximation est basée sur le fait qu'à rendements égaux, un paramètre de courbure "a" inferieur (infinitésimal dans le cas de la courbe A) nécessite une dose "x" plus grande.

IV.2.1.2 - Coefficient réel d'utilisation de l'engrais apporté (CRU)

Les résultats précédents traduisent l'efficacité apparente de l'urée sur le rendement de la plante. Cette efficacité est le résultat d'une part d'un effet direct de l'azote engrais sur la plante et, d'autre part, d'un effet indirect par accroissement de la capacité de la plante à absorber l'azote du sol (effet de l'azote engrais sur le système racinaire).

L'utilisation directe de l'azote urée par la plante (parties aériennes) est jugée sur les critères du coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté (CRU %), de l'azote engrais absorbé

par la plante (NdfF) et du pourcentage d'azote de la plante dérivé de l'engrais (NdfF %) définis au paragraphe II.2 page 52.

Le CRU % est étudié à l'échelle de l'année (variation intra-annuelle) et à l'échelle de trois années (variation inter-annuelle).

1- Variation du coefficient réel d'utilisation de l'engrais dans le temps et au cours d'une culture.
Essai au champ I sur mil.

Les paramètres permettant d'aboutir au bilan de l'azote dans la plante figurent aux tableaux 3 A, 4 A et 5 A en annexe. Les CRU et NdfF sont regroupés au tableau 6. Les figures 12a et 12b courbes A, déduites des tableaux précédents, illustrent la variation du NdfF et du N total.

Alors que le rendement matière sèche et le N total augmentent constamment en cours de cycle, le NdfF, aprés un accroissement rapide, diminue sensiblement à partir du 20-25ème jour jusqu'au 35-45ème jour, puis remonte jusqu'au stade maturité. A ce stade les CRU atteignent 18 % et 19% à 30 N, 24% et 27% à 90 N. Ce phénomène de diminution d'azote 15 (ou d'engrais) en cours de cycle, surprenant, s'observe aussi bien aux doses 30 N que 90 N.

Cette diminution en cours de cycle des CRU et NdfF ne peut résulter que d'une perte nette de traceur hors du végétal en cours de cycle : la plante perd plus d'azote engrais qu'elle n'en absorbe.

La figure 12b courbe A met en évidence une absorption continue et croissante d'azote dans la plante. Entre le 22ème et le 35ème jour, cette absorption croissante s'oppose à la décroissance du NdfF ou du CRU % qui varient de façon similaire en raison de l'équation suivante :

$$CRU\ \% = \frac{NdfF}{NF} \times 100 = k\ NdfF$$

Cette observation atteste une absorption d'azote provenant de la matière organique du sol, supérieure, quantitativement, à la perte d'azote engrais.

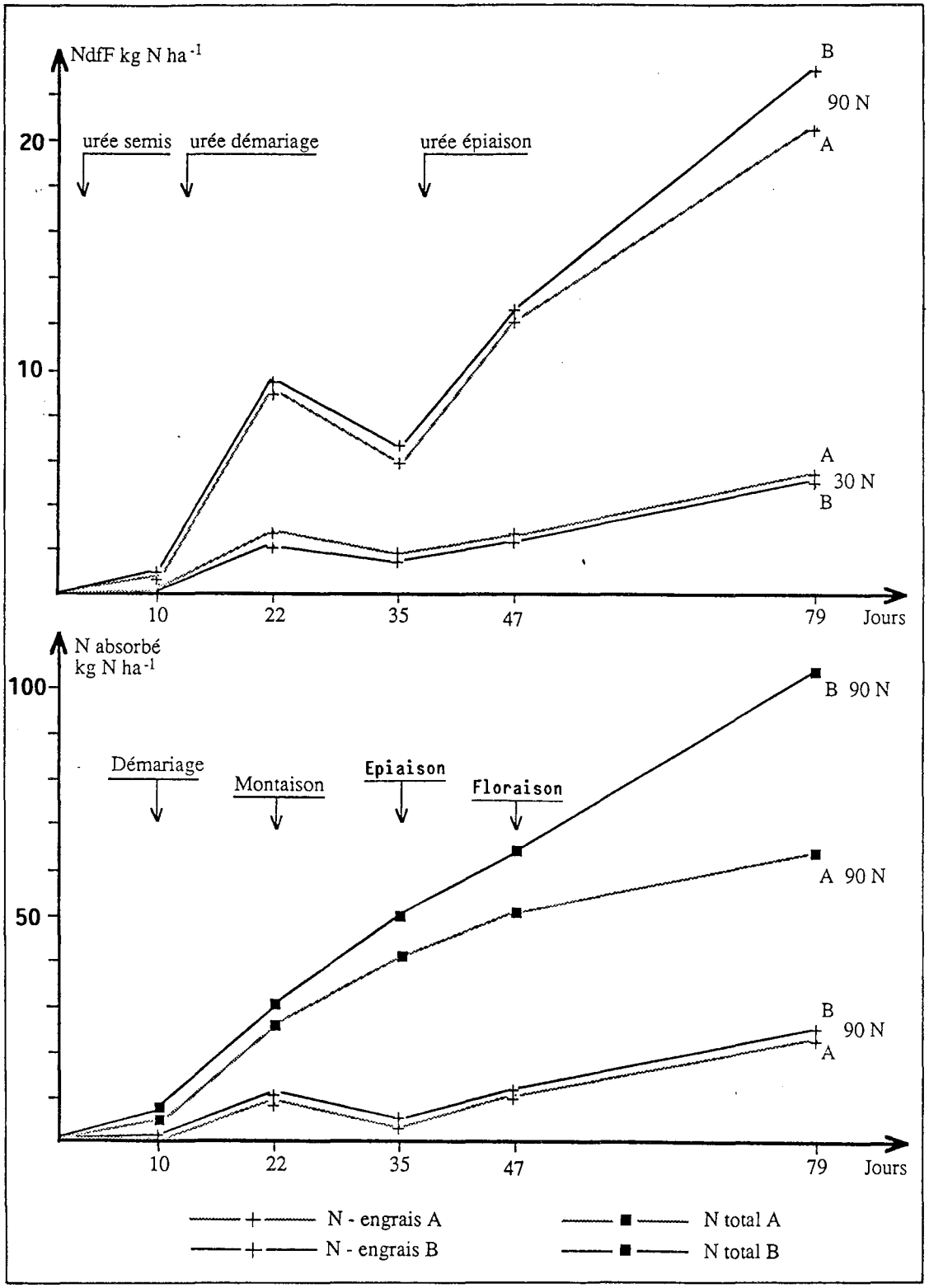


Figure 12 : a (haut) : variation des NdfF au cours du temps ;

b (bas) : variation de N total et de NdfF au cours du temps.

A : sans compost ; B : avec compost.

90 N et 30 N : doses d'azote engrais apportées.

Essai au champ I.

Tableau 6 : Coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté (urée) exprimé en % (C R U %) et azote de la plante dérivé de l'engrais (NdfF) exprimé en % et kg N ha^{-1}., Mil variété Syn. 1 - Bambey, essai I.

Traitement		Stades végétatifs														
		(1) Démariage			(2) Montaison			(3) Epiaison			(4) Floraison			(5) Maturité		
Urée	Compost	NdfF %	NdfF kg ha^{-1}	CRU %	NdfF %	NdfF kg ha^{-1}	CRU %	NdfF %	NdfF kg ha^{-1}	CRU %	NdfF %	NdfF kg ha^{-1}	CRU %	NdfF %	NdfF kg ha^{-1}	CRU %
30 N	+	2.8	0.209	3.7	10.1	2.31	13.1	7.7	1.77	10.0	7.0	2.68	9.1	10.6	5.31	18.0
	0	3.6	0.235	4.0	17.1	2.84	16.1	10.8	2.10	11.9	12.9	2.86	9.7	17.0	5.66	19.2
90 N	+	8.3	0.625	3.5	32.5	9.82	18.5	14.2	6.47	12.2	20.0	12.73	14.4	23.1	23.96	27.1
	0	11.6	0.810	4.6	35.3	9.13	17.2	18.7	6.10	11.5	26.4	12.64	14.3	32.1	21.39	24.2

C.V. et significativité à P = 0.05				
	Effet Dose N	38 % N.S	34 % N.S	28 % S	15 % S
	Effet Compost	25 % N.S	18 % N.S	32 % N.S	20 % N. S

(1) CRU % pour 1/5 dose totale N (N_1)

(2) et (3) CRU % pour 3/5 dose totale N ($N_1 + N_2$)

(4) et (5) CRU % pour dose totale N ($N_1 + N_2 + N_3$)

Ce tableau résulte des tableaux 3A, 4A et 5A en annexe.

Tableau 7 : Pourcentage de l'azote engrais retrouvé dans la plante (CRU %) et dans le sol (NiS %).

a - Séfa, essai V, 1983

Mode d'apport de l'urée	Grains	Feuilles + Spathes	Tiges	Rachis	Total plante (CRU %)	Sol (NiS %)	Total sol + plante
Surface	26.5 a	13.4 a	1.5 a	3.2 a	44.6 a	37.8	82.4
Bande	37.5 b	15.6 a	2.3 b	4,8 b	60.2 b	38.3	98.5
CV %	13.9	18.8	11.8	26.7	14.1	14.6	

b - Séfa, essai VI, 1984

Mode d'apport de l'urée	Grains	Feuilles + Spathes	Tiges	Rachis	Total plante (CRU %)	Sol (NiS %)	Total sol + plante
Surface	18.9 a	9.0 a	1.90 a	1.6 a	31.5 a	32.0	63.5
Bande	34.6 b	14.5 b	3.7 b	2.6 b	55.4 b	35.4	90.8
Poquet	40.0 b	16.0 b	3.8 b	2.5 b	62.3 b	32.7	95.0
CV %	15.3	19.8	22.0	20.9	13.8		

c - Séfa, essai VII, 1985

Mode d'apport de l'urée	Grains	Feuilles + Spathes	Tiges	Rachis	Total plante (CRU %)	Sol (NiS %)	Total sol + plante
Surface	17.1 a	4.3 a	1.4 a	1.6 a	24.5 a	32.7	57.2
Bande	32.9 b	6.1 b	5.2 b	2.7 b	46.9 b	35.9	82.8
Poquet	34.3 b	7.7 b	5.1 b	3.6 b	50.7 b	51.9*	102.6
C.V. %	17.5	23.2	15.2	31.5	14.0		

*Valeur surestimée vraisemblablement suite à un défaut d'échantillonnage entrainant un bilan supérieur à 100.

Test de Newman et Keuls à P = 0,05 %.

Ce tableau résulte des tableaux 6A, 7A et 8A en annexe.

2 - Etude pluriannuelle du coefficient réel d'utilisation de l'engrais
Essais au champ V, VI et VII sur maïs

Les paramètres permettant d'aboutir au bilan azote 15 dans la plante figurent aux tableaux 6 A, 7 A et 8 A en annexe. Les CRU sont regroupés au tableau 7.

Les CRU relatifs à la méthode d'apport de l'engrais "en surface" (appliquée par les agriculteurs) sont de 24, 31 et 45 % respectivement pour les années 1985, 1984 et 1983. A Nioro, un CRU moyen de 35 % a été trouvé sur maïs (paragraphe IV.2.2.1 page 109).

IV.2.1.3 - Immobilisation de l'engrais dans le sol (NiS)

Les résultats sont regroupés aux tableaux 9 A (pour le mil), 10 A, 11 A et 12 A (pour le maïs) en annexe, et schématisés aux figures 13 (pour le mil) et 14, 15 et 16 (pour le maïs). Pour le mil, ils mettent en évidence une immobilisation importante dans les 40 premiers cm du sol : 56 % pour la dose 30 N et 40 % pour la dose 90 N, et fortement réduit entre 40 cm et 80 cm : 8 % pour la dose 30 N et 6 % pour la dose 90 N. Entre 80 cm et 120 cm, elle est comprise entre 0 et 3 %, donc faible (chaque point des courbes indique l'immobilisation moyenne pour l'horizon considéré).

Pour le maïs, en moyenne sur les trois années 1983, 1984 et 1985 le NiS est de 34 % dans l'ensemble du profil et 19 % dans l'horizon 0-30 cm. A Nioro, une valeur moyenne de 30 % a été trouvée sous maïs dont 16 % dans l'horizon 0-30 cm (paragraphe IV.2.2.2 page 110).

Cette immobilisation sous forme organique (corps microbiens et vraisemblablement incorporation dans certaines fractions humiques) dans l'horizon du sol prospecté par les racines représente une forme de stockage de l'engrais relativement stable, pouvant contribuer à long terme au maintien de la fertilité azotée du sol (JACQUIN 1989). La quantité d'azote engrais qui jouera effectivement ce rôle est désignée par NiSP (voir glossaire), non mesurable directement.

IV.2.1.4 - Efficience réelle de l'engrais

Définie au paragraphe II.2 page 52, cette efficience réelle mesure le pourcentage de l'engrais "retrouvé" et "non perdu".

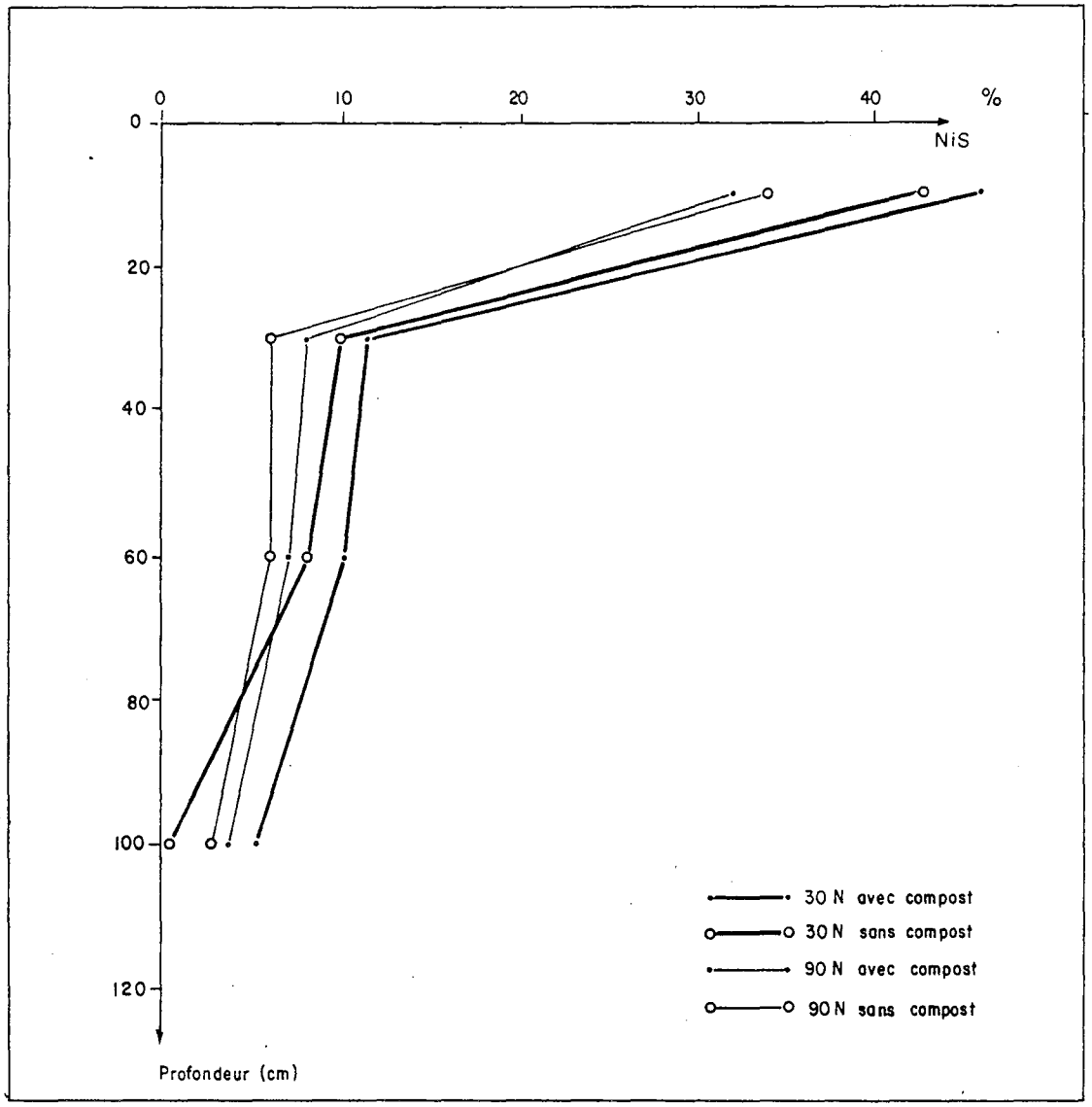


Figure 13 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol sous culture de mil. Dose urée 30 et 90 kg N ha^{-1} sans compost (A) et avec compost (B). Bambey, essai au champ I.

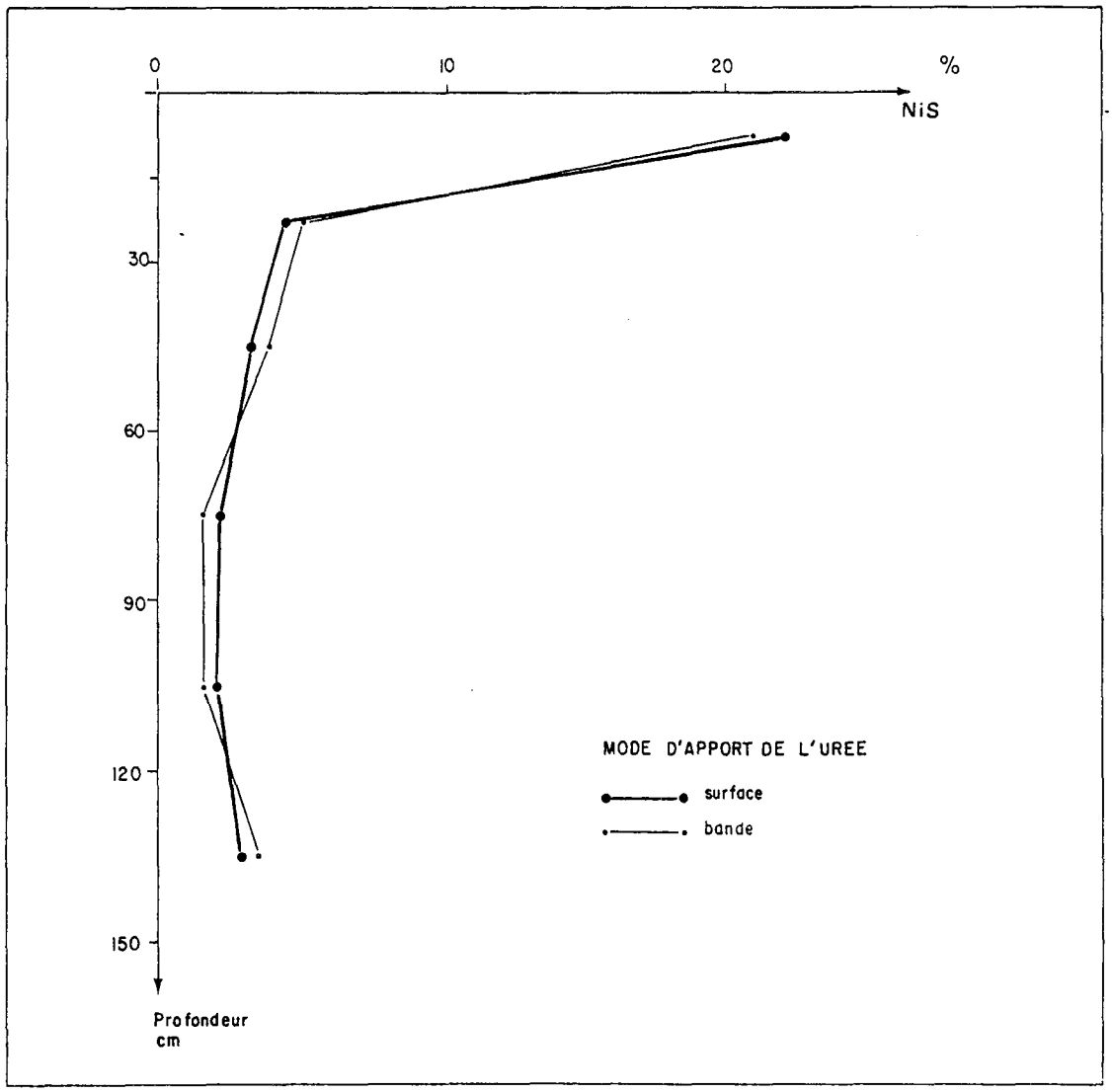


Figure 14 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée à 100 kg N ha^{-1}. Séfa, essai au champ V.

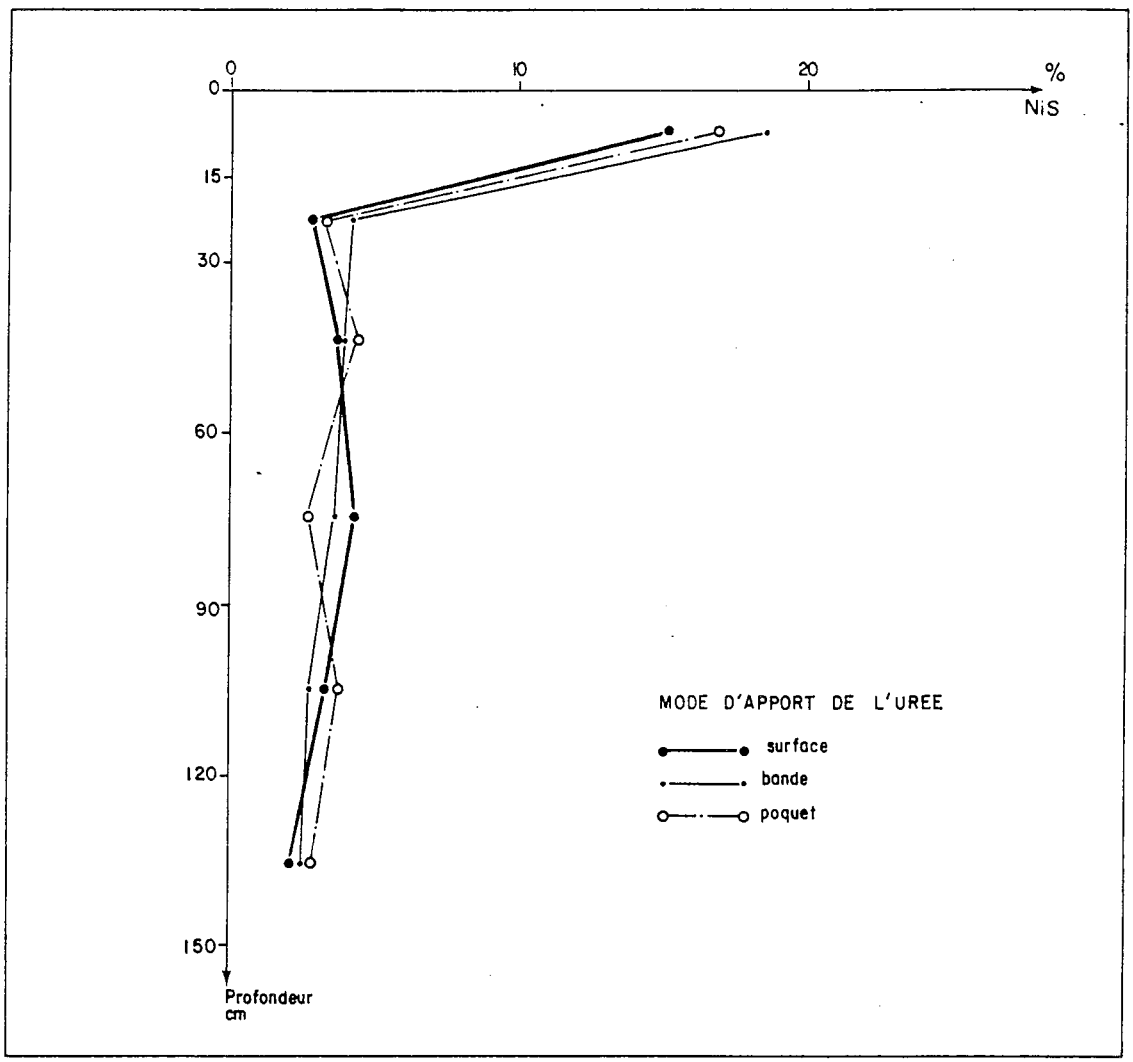


Figure 15 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Séfa, essai au champ IV.

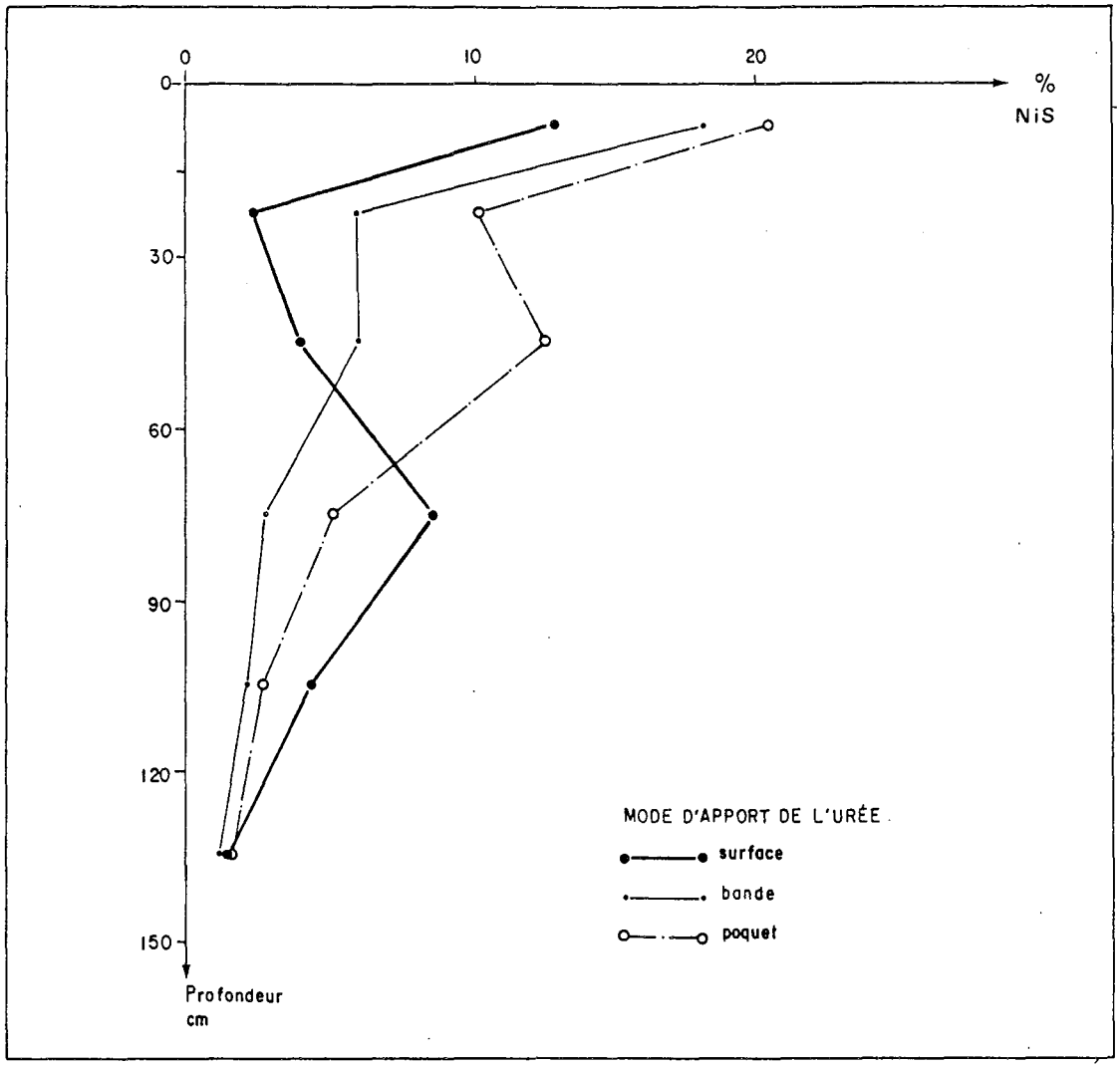


Figure 16 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Séfa, essai au champ VI.

Tableau 8 : Pourcentage de l'azote engrais retrouvé dans la plante (CRU %) et dans le sol (NiS %). Mil variété syn. 1. Bambey, essai I.

Traitement							
Dose N kg ha^{-1}	Compost	Grains	Rachis + glumes	Pailles	Total plante (CRU %)	Sol (NiS %)	Total plante + sol Efficience réelle approchée par excès
30 N	+	7.4	4.3	6.3	18.0	71.9	89.9
	0	9.8	3.9	5.5	19.2	60.3	79.5
90 N	+	10.7	4.0	12.5	27.1	50.5	77.6
	0	11.7	4.7	7.8	24.2	48.4	72.6
C.V et significativité (S ou N.S) pour l'effet dose N :					15 % S	14 % S	
à P = 0.05 pour l'effet compost :					20 % N.S	6 % S	

Ce tableau résulte du tableau 5A en annexe.

Les résultats du bilan azote 15 (efficience réelle approchée par excés) sont regroupés dans le tableau 8 (traitement "sans compost") pour le mil et dans le tableau 7 (traitement "surface") pour le maïs.

Selon l'équation 14, l'efficience réelle peut être estimée dans l'intervalle suivant :

72 % < Efficience urée 30 N sur mil à Bambey < 80 %

64 % < Efficience urée 90 N sur mil à Bambey < 72 %

53 % < Efficience urée 100 N sur maïs à Séfa < 68 %

A Nioro, une efficience réelle de 65 % (approchée par excès) a été trouvée en culture de maïs (paragraphe IV.2.2.3 page 110).

IV.2.1.5 - Valeur A et fourniture d'azote par le sol

Définie au paragraphe III.2.1 page 62, la valeur A mesure le pool d'azote du sol en équivalent engrais. Les résultats sont regroupés au tableau 9 pour le mil (traitement "sans compost") et au tableau 10 pour le maïs (traitement "surface").

Sous le mil, les valeurs A sont de 145 et 185 kg N ha^{-1} équivalent urée pour les doses 30 N et 90 N. Dans l'essai II, sous mil, à Bambey, une valeur A de 165 kg N ha^{-1} équivalent urée est trouvée pour une dose d'urée de 90 N (tableau 18 page 135).

La légère augmentation de la valeur A sous l'action de la dose d'azote est vraisemblablement due à l'effet cumulatif de l'engrais dans le sol fertilisé depuis quatre ans et non à l'effet direct de la dose, les travaux de l'AIEA ayant montré que la valeur A est indépendante de la dose d'azote apportée (AIEA 1983).

Sous maïs recevant l'urée en surface, les valeurs A sont de 85, 115 et 95 kg N ha^{-1} équivalent urée, respectivement pour les années 1983 (essai V), 1984 (essai VI) et 1985 (essai VII). A Nioro, une valeur de 145 kg N ha^{-1} est trouvée sous maïs (paragraphe IV.2.2.4 page 110).

Effectuer la comparaison des valeurs A entre Bambey et les deux autres stations serait incorrect en raison d'une différence entre les longueurs de cycle des céréales que nous

Tableau 9 : Bilan général de l'azote après culture et quantité d'azote absorbé pour produire 1000 kg de grains.
Mil var. syn. 1 - Bambey, essai I.

Dose N kg/ha	Compost	N total plante kg N ha^{-1}	NdfF		NdfS	NiS	NdfF + NiS	Valeur "A" équivalent urée	Quantité d'azote absorbée pour produire 1000 kg grains (kg)		
			%	kg N ha^{-1}	kg N ha^{-1}	kg N ha^{-1}	kg N ha^{-1}	kg N ha^{-1}	N-sol	N-engrais	N total(1)
	+	49.7	10.6	5.3	44.4	21.2	26.5	248	31.90	3.81	35.71
30											
	0	33.1	17.0	5.7	27.4	17.8	23.5	144	24.25	5.04	29.29
	+	103.9	23.1	24.0	79.9	44.6	68.6	294	37.04	11.10	48.24
90											
	0	66.4	32.1	21.4	45.0	42.8	64.2	187	23.70	11.30	35.00

Effet dose N : significatif sur le NdfF (C.V = 15 %) et le NiS % (C.V = 14 %)

Effet compost : non significatif sur le NdfF (C.V = 20 %)
significatif sur le NdfS (C.V = 16 %)

Rendement témoin ON 36,7 et 19.4 kg N ha^{-1} respectivement avec et sans compost.

(1) inverse de l'indice d'efficience de l'azote.

Ce tableau résulte du tableau 5A en annexe.

Tableau 10 : Bilan général de l'azote après culture et quantité d'azote absorbé pour produire 1000 kg de grains - Maïs - Séfa, essais V, VI et VII.

			NdfF		NdfS		Valeur "A" kg N ha^{-1}	Quantité d'azote mobilisé pour produire 1000 kg de grain (kg)		
		N total plante kg N ha^{-1}	%	kg N ha^{-1}	%	kg N ha^{-1}	équivalent urée	N-sol	N-engrais	N total(1)
Essai V 1983	S	85.42	54.0	44.6	46.0	40.8	84.8	11.01	12.90	23.91
	B	106.57	58.37	62.2	41.6	44.4	71.3	9.79	12.90	23.91
Essai VI 1984	S	64.95	46.36	30.1	53.6	34.8	115.7	12.1	10.49	22.59
	B	84.92	65.46	55.6	34.5	29.3	52.8	8.35	15.80	24.15
	P	101.59	62.08	63.1	37.9	38.5	61.1	10.97	15.60	26.57
Essai VII 1985	S	48.33	51.65	25.0	48.3	23.4	93.6	9.12	9.7	18.2
	B	70.89	67.78	48.0	32.2	22.8	47.5	7.40	15.60	23.00
	P	76.89	65.71	50.5	34.3	26.4	52.2	7.40	14.16	21.56

S = Surface B = Bande P = Poquet

Rendement témoin ON = 19,12 kg N ha^{-1}

(1) inverse de l'indice d'efficience de l'azote.

Ce tableau résulte des tableaux 6A, 7A et 8A en annexe.

y étudions (voir tableau 4) ; elle sera faite ici seulement à titre indicatif, parce qu'elle confirme la tendance observée entre Nioro et Séfa sous maïs.

En effet, les trois essais annuels analysés donnent des valeurs A de 165 kg N ha^{-1}, 145 kg N ha^{-1} et 100 kg N ha^{-1} respectivement pour Bambey (mil), Nioro (maïs) et Séfa (maïs). Ces résultats montrent une tendance à la diminution de la valeur A selon un gradient nord-sud. Nous savons que la valeur A est fonction du rapport :

$$\frac{E\ \%}{E'\ \%} = \frac{1}{\%\ NdfF}$$

dont elle résulte par le calcul (équation 17 page 63). Sa diminution découle directement de l'augmentation du % NdfF que nous avons mesurée, et dans ce cas, rien ne nous autorise à l'imputer à une diminution du pool d'azote du sol du fait que les conditions environnementales ne sont pas identiques.

L'azote sol est prépondérant dans la nutrition azotée des deux céréales hormis dans le sud à Séfa où sa contribution est équivalente à celle de l'engrais : le % NdfS est pour le mil de 83 % à la dose 30 N et 68 % à la dose 90 N ; pour le maïs, il est en moyenne de 50% sur les trois années à la dose 100 N. A Nioro, un % NdfS de 58 % a été trouvé dans le maïs (paragraphe IV.2.2.4 page 110). Il est intéressant de noter que pour un N total identique de 66 kg N total ha^{-1} du mil (essai I, 90N) et du maïs (moyenne des essais V, VI et VII), les NdfF et NdfS exprimés en kg N ha^{-1} sont respectivement de 33 et 33 pour le maïs et 21 et 45 pour le mil (tableaux 9 et 10).

IV.2.1.6 - Discussion - Conclusions

Les rendements en grains sont faibles : à la dose d'azote optimale calculée dans un contexte économique où il faudrait 7 kg de céréale pour payer une unité d'azote, ils sont de 16,7 q M.S ha^{-1} pour le mil à la dose 88 N et de 18,7 q M.S ha^{-1} pour le maïs à la dose de 110 N.

Par recours à la méthode isotopique, nous avons pu mettre en évidence et mesurer la répartition de l'azote engrais après culture. Sur mil, le coefficient réel d'utilisation (CRU) de l'urée est faible : environ 25 % à la dose optimale ; en revanche, l'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (Nis) est élevée :

40 % à cette dose dans l'horizon 0-40 cm. En cours de cycle, dans **une période allant de la mi-montaison à l'épiaison, des pertes importantes d'azote engrais hors de la plante sont mises en évidence, de l'ordre de 30 à 40 % de l'azote engrais absorbé.** Ces pertes peuvent avoir trois origines : (1) par migration vers le sol sous forme d'exsudats racinaires, (2) par chute d'organes (feuilles, talles), (3) par voie aérienne sous forme gazeuse ou par lavage par les pluies. Les premieres ont été signalées par nombre d'auteurs cités par WETSELAAR et FARQUHAR (1980) et signalées plus recemment par GUIRAUD (1984). Les secondes ont été signalées sur le mil par SIBAND (1981) ; elles se produisent principalement en cours de cycle au moment de la régression des talles. Les pertes par voie gazeuse ou par lavage par les pluies expliqueraient en grande partie les pertes d'azote d'aprés WETSELAAR et FARQUHAR (1980). Nous retiendrons l'hypothèse de pertes d'azote par voie racinaire et par régression des talles ; ces deux processus expliquant très bien la variation concomitante du CRU % et du % NdfF ; l'azote "perdu" serait donc restitué au sol.

Il existe vraisemblablement une relation entre le NiS élevé et le faible CRU.

Sur maïs, les CRU sont plus élevés, en moyenne 34 % à la dose de 100 N pour un Nis moyen de 20 % dans l'horizon 0-30 cm et un NiS de 35 % dans tous le profil (moyenne de trois années).

Les NiS sont donc importants mais variables d'une année à l'autre, d'une situation à une autre (30 à 50 %) à la dose optimale calculée au paragraphe IV.2.1.1 page 87. Ces valeurs sont proches de celles trouvées en région tempérée sous culture de blé par MYERS et PAUL (1971), à savoir un NiS compris entre 25 et 45 % dans l'horizon 0-90 cm pour une dose de 112 N.

Il apparaît alors intéressant de mettre en relation la productivité de l'azote engrais avec sa répartition dans le système sol-plante. **En fumure azotée optimale, la productivité moyenne de l'unité d'azote engrais est de 14 pour le mil à Bambey et 17 pour le maïs à Séfa.** La comparaison à la productivité moyenne de 18 obtenue en France sur blé (SCORRAILLE 1987) permet de situer l'efficacité de l'engrais azoté sur ces deux céréales au Sénégal : moyenne sur mil et élevée sur maïs.

Malgré des faibles CRU (inférieurs à 35 %), la productivité de l'azote engrais est donc moyenne à élevée. Ces deux résultats traduisent **l'effet primordial de l'engrais azoté dans l'accroissement de la capacité de la céréale à absorber l'azote du sol** ; effectivement, les deux céréales absorbent de 6 à 19 kg N-sol ha^{-1} en absence d'engrais azoté (tableaux

5 A, 6 A, 7 A et 8 A en annexe) et 25 à 45 kg N-sol ha^{-1} à la dose d'engrais optimale, **le mil présentant les valeurs les plus élevées** (tableaux 9 et 10). **L'engrais azoté à la dose optimale multiplie au moins par deux la fourniture d'azote sol à la plante.**

Cet effet semble relativement plus accentué pour le système mil - sol "dior" (% NdfS = 70 %) que pour le système maïs - sol "beige" (% NdfS = 50 %). En d'autres termes, en fumure azotée optimale, pour produire 1000 kg de grains, le mil absorbe 11 kg de N-engrais et 23 kg de N-sol, le maïs absorbe aussi 11 kg de N-engrais mais seulement 11 kg de N-sol (tableaux 9 et 10).

L'absence de la référence culture du mil dans notre dispositif de recherche à Séfa, ne nous permet pas de dissocier l'effet lié à la zone écologique de celui lié à la plante.

Cependant, nous référant aux travaux de BLONDEL (1971 c) sur les caractéristiques permettant de distinguer les céréales pour ce qui concerne l'alimentation azotée, l'examen de **l'indice d'efficience de l'azote pour chacune des deux céréales indique la primauté du facteur plante.** Défini aussi comme l'inverse du nombre de kg de N total absorbé (NdfF + NdfS) pour produire 1000 kg de grains, corrélé positivement avec l'indice de rendement (harvest index), l'indice d'efficience permet à BLONDEL de classer les céréales tropicales en deux groupes : un groupe qui comprend le mil et le sorgho à indice bas compris entre 23 et 30, un deuxième groupe qui réunit le riz et le maïs dont la valeur d'indice dépasse 40. Nos résultats attestent effectivement une différence très nette entre le mil et le maïs ; les indices d'efficience moyens assortis de l'intervalle de confiance ($\pm$ t Sx) sont respectivement de 25 (25.26 ± 1.8) et de 45 (44.10 ± 1.5).

Le mil, par rapport au maïs, exige donc plus d'azote pour faire la même quantité de grains et ce "plus" est pris au sol et non à l'engrais. En d'autres termes, et pour exprimer mieux la réalité, nous pouvons dire **qu'en présence d'une même quantité d'azote, le maïs produit plus de grains que le mil.**

Une double question se pose pour le maïs : le % NdfS peut-il être accru ? Est-ce l'utilisation de l'azote sol par le maïs ou la fourniture par le sol qui est limitante, ou l'une et l'autre ? Les questions soulevées sont importantes ; pour cette raison elles nécessitent le concours de physiologistes des plantes.

Nous avons ensuite essayé d'interpréter les résultats de variation de valeur A. Sa diminution peut être la cause ou la conséquence d'une augmentation du % NdfF ; elle ne nous autorise pas, par conséquent, à l'imputer à une diminution du pool d'azote du sol. Ceci

confirme que la validité des comparaisons de valeur A ne peut être assurée qu'en conditions environnementales identiques et avec des plantes de même cycle présentant le même rythme de développement.

Enfin, la mesure du pourcentage de l'azote engrais retrouvé dans le système sol-plante, fait apparaître **un déficit dans le bilan azoté de l'ordre de 30 %, attribué aux pertes d'azote dans l'atmosphère.** Ces pertes sont importantes et de l'ordre de 30 kg N ha^{-1} aux doses d'engrais optimales proches de 100 N, et imposent la recherche **d'un accroissement de l'efficience de l'azote engrais sans perdre de vue la nécessité d'accroître l'utilisation de l'azote sol** et surtout **le maintien du pool d'azote mobilisable du sol** donc de son taux de matière organique.

IV.2.2 - Variabilité spatiale

Essai au champ IV

Déjà réalisée en sols ferrugineux tropicaux pour les caractéristiques hydrodynamique (IMBERNON 1981), pour la texture (CISSE et VACHAUD non publié 1987), pour la matière organique (FELLER *et al* 1981), pour la nodulation des légumineuses (WEY et OLIVER 1982), l'étude de la variabilité spatiale d'une parcelle considérée comme homogène est un préalable nécessaire à toute étude impliquant le sol comme support et source d'éléments nutritifs pour la plante. MOREL (1989) souligne que "les variations des facteurs qui conditionnent les teneurs du sol en éléments solubles ou "assimilables" sont de même amplitude qu'il sagisse d'une étendue relativement grande ou d'une petite surface". A cet égard, l'efficience de l'engrais étant évaluée à l'échelle du système cultural, donc du champ, il nous est apparu nécessaire dans une première approche d'appréhender la dispersion des résultats parcellaires (micro-parcelle) au sein d'une grande parcelle assimilée à un champ. C'est le but de cet essai qui comporte 42 micro-parcelles de 1,12 m^2 délimitées dans un champ de 3800 m^2. La dispersion des résultats est représentée graphiquement par un histogramme (DAGNELIE 1973).

IV.2.2.1 - Coefficient d'utilisation réel de l'engrais (CRU %)

Les paramètres permettant d'aboutir au bilan azote 15 dans la plante figurent au tableau 13 A en annexe.

Le C.R.U moyen est de 35 %, sa variation étant comprise entre 25 et 46 %. L'histogramme (figure 17) montre :

(1) que le mode (valeur de la classe dont l'effectif est maximum) appartient à la classe de centre 37 % ;

(2) une chute sensible de l'effectif au-delà de cette classe.

IV.2.2.2 - Immobilisation de l'engrais dans le sol (NiS)

Les paramètres permettant d'aboutir au bilan azote 15 dans le sol figurent au tableau 14 A en annexe. Le NiS est de 30 %, sa variation étant comprise entre 17,5 et 45,5. L'histogramme (figure 18) fait apparaître :

(1) deux modes appartenant aux classes de centre 26 % et 33 %, modes *a priori* sans réalité propre ;

(2) une chute sensible de l'effectif au delà de la classe de centre 33 %.

Le profil de NiS (figure 20) montre une décroissance trés nette au delà de 20 cm. Dans l'horizon 80-120 cm, seulement 3 à 5 % de l'engrais sont retrouvés, laissant supposer qu'au delà cette profondeur le lessivage de l'urée est minime.

IV.2.2.3 - Efficience réelle de l'engrais (CRU % + NiS %)

Telle que nous l'avons définie au paragraphe II.2.2 page ,l'efficience réelle approchée par excès de l'urée apportée sur le maïs est de 65 % (tableau 11). Selon l'inéquation 14, l'efficience réelle peut être estimée dans l'intervalle suivant :

51 % < Efficience urée 100 N sur maïs à Nioro < 65 %

Cet intervalle est proche de celui mis en évidence à Séfa (page 145, urée en surface).

Les pertes d'azote engrais principalement dans l'atmosphère (érosion et ruissellement étant admis négligeables) sont donc de l'ordre de 35 % de l'urée apportée (elles étaient de 30 % sous mil à la dose d'urée de 90 N).

L'histogramme des pertes d'azote engrais (figure 19) montre une distribution d'allure normale, ce qui n'était pas le cas pour les CRU et le NiS, avec le maximum d'apparition de la classe 35 à 39 % et la décroissance des effectifs de part et d'autre ; **80 % des parcelles présentent des pertes comprises entre 25 % et 45 %.**

IV.2.2.4 - Valeur A et fourniture d'azote par le sol

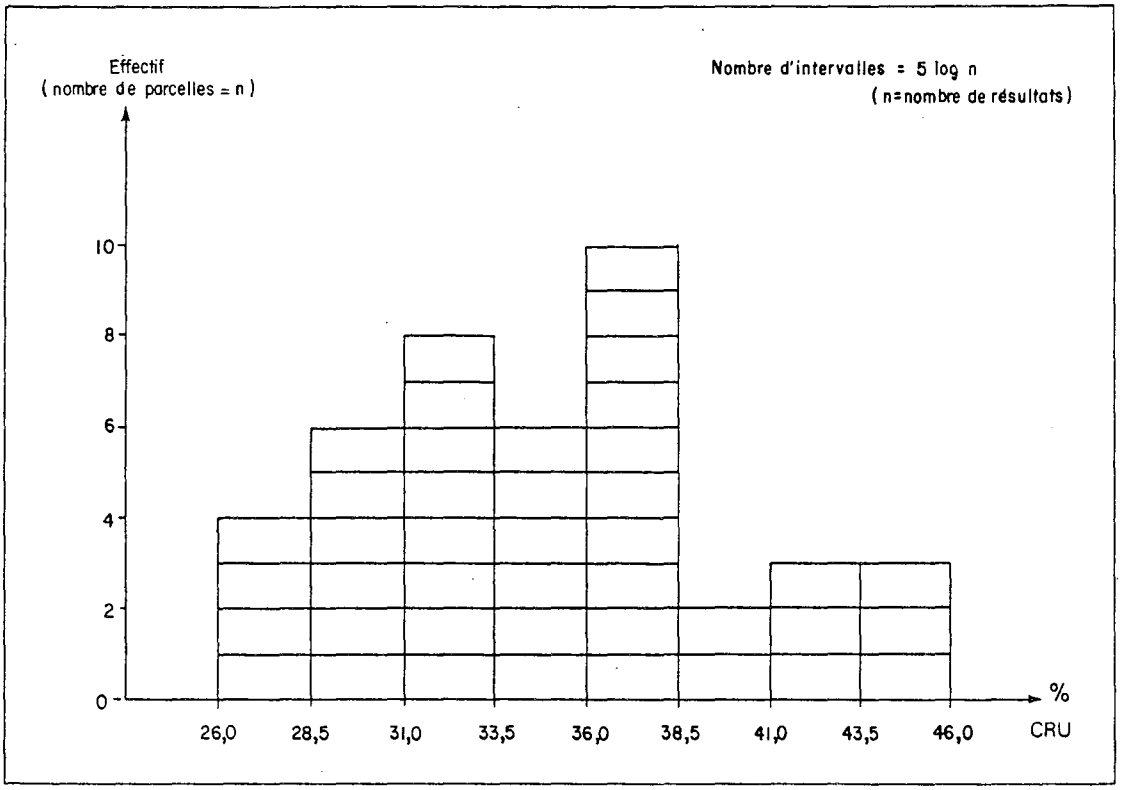


Figure 17 : Histogramme des coefficients réels d'utilisation de l'azote engrais (CRU %) d'une culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

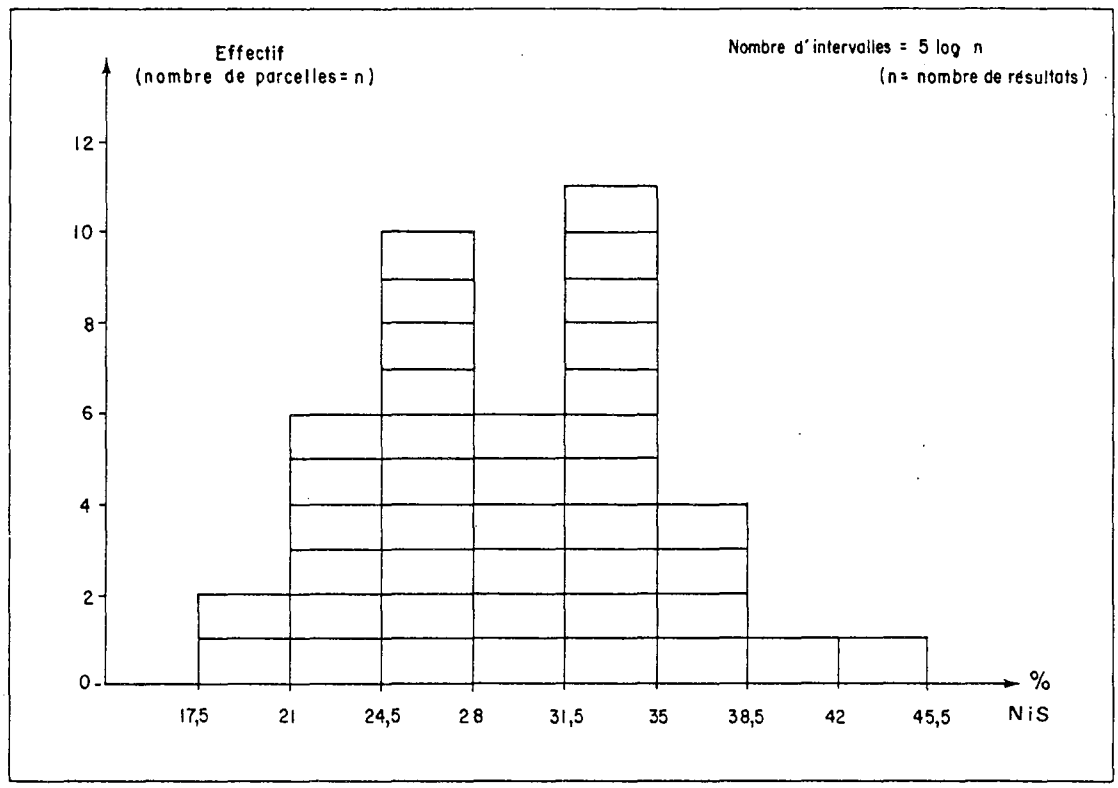


Figure 18 : Histogramme des quantités d'azote engrais immobilisé dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

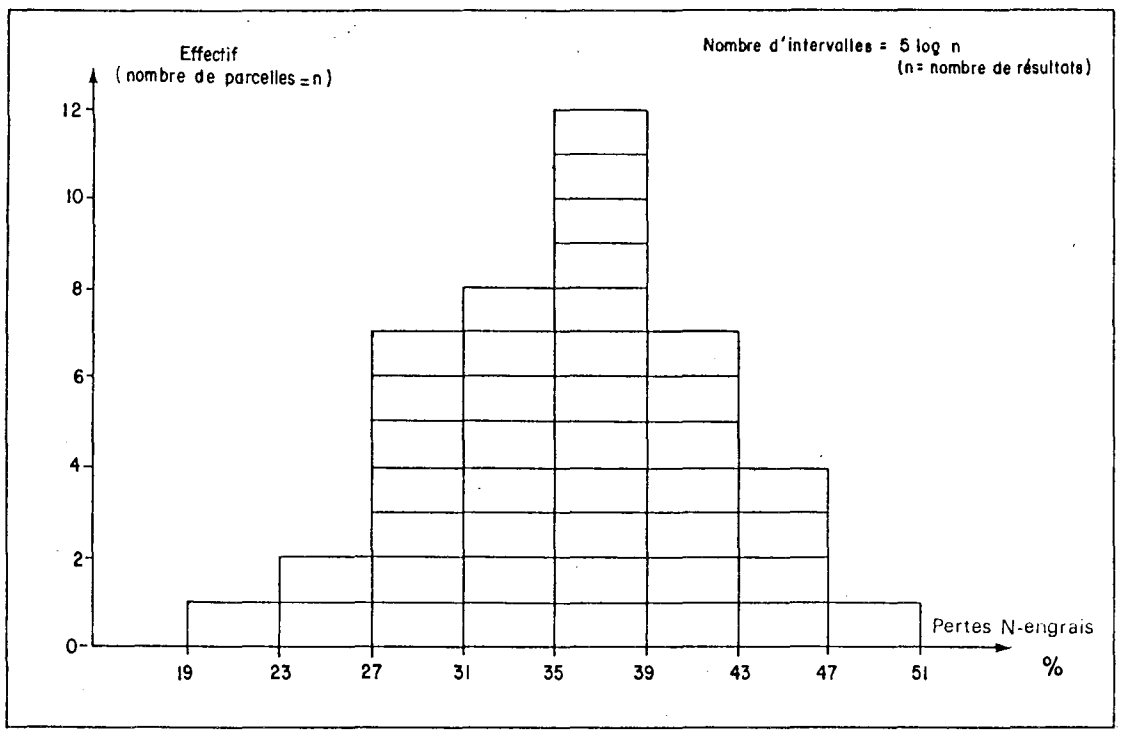


Figure 19 : Histogramme des pertes d'azote engrais hors du sol cultivé en maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

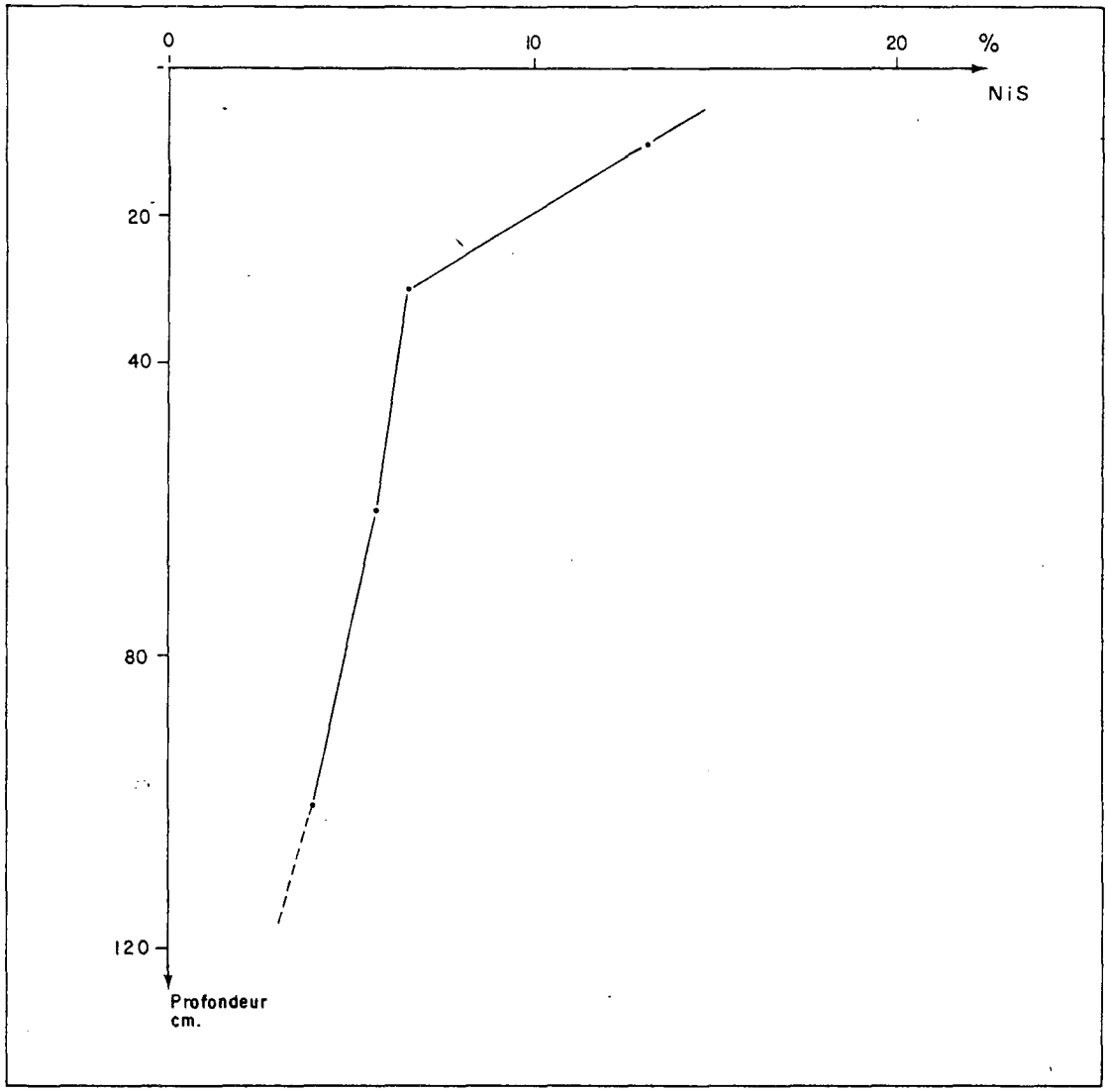


Figure 20 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

Tableau 11 : Pourtentages de l'azote engrais utilisé par la plante (CRU %) et immobilisé dans le sol (NiS %). Culture de Maïs - Nioro, essai IV.

	Plante (CRU %)	Sol (NiS %)	Total
N-engrais	35.0 %	29.7 %	64.6 %
Intervalle de confiance à P = 0.05	-	-	±1.6
C.V.	-	-	13 %

La valeur A équivalent urée est en moyenne de 145 kg N ha^{-1}. L'azote sol est prépondérant dans la nutrition azotée du maïs (51 kg N-sol ha^{-1} contre 37 kg N-engrais ha^{-1} soit un NdfS de 58 %).

IV.2.2.5 - Conclusion

La distribution des CRU et de NiS fait apparaître une assez grande variabilité sur le terrain, et une dissymétrie provoquée par une chute des effectifs au delà du mode 37 % pour le CRU et 33 % pour le NiS. Mais ces deux paramètres sont liés entre eux dans le système sol-plante ; de ce fait, il est plus judicieux de considérer le bilan (ou les pertes) de l'azote engrais logiquement corrélé au milieu morphopédologique en conditions de culture homogène. Effectivement, dans notre essai, la distribution des pertes apparaît comme normale.

Ainsi, pour les études d'efficience de l'engrais azoté, importe-t-il de considérer le système sol-plante. Il en résulte la nécessité d'une prudence accrue quant à l'interprétation des résultats expérimentaux ne portant que sur la plante.

IV.2.3 - Lixiviation de l'engrais

Essai au champ III

BLONDEL (1971 a-c) a suivi la lixiviation de l'azote en différents sites du Sénégal. A Bambey, malgré un bilan hydrique largement déficitaire, on observe, en quelques semaines pendant la saison des pluies, une perte d'azote par lixiviation qui est en relation directe avec la pluviométrie. Il trouve une relation linéaire entre la lixiviation des nitrates et la pluviométrie en mm : un mm de pluie provoque une descente des nitrates de 0.7 cm.

La lixiviation de l'azote dans les sols sableux du Sénégal a ensuite été étudiée par PIERI (1982) et CISSE (1986) qui ont utilisé des cellules de prélèvement de solution du sol ; la détermination du bilan hydrique associée à la connaissance des teneurs minérales de la solution du sol leur ont permis d'estimer en culture semi-intensive des pertes en azote comprises entre 10 et 50 kg N ha^{-1} sous arachide et négligeables sous mil. Ces pertes présentent une grande variabilité spatiale.

Dans l'essai au champ III en objet, le marquage isotopique de la solution du sol nous permet de suivre la lixiviation de l'azote engrais.

IV.2.3.1 - Lixiviation en cours de cycle et utilisation de l'azote engrais par la plante

Les pluies très importantes de début de cycle (figure 3 A en annexe) ont provoqué

Tableau 12 : Excès isotopique de la solution du sol sous mil variété Souna III. Bambey, essai III.

Prélèvements	Profondeur	N° parcelle	Volume prélevé	Nppm	E %
Premier prélèvement 29-08-80 (+ 3 jours après premier apport)	30 cm	1	160	71	0
		4	90	90	0
		7	50	49	0
		10	45	64	0
		11	35	74	0
	60 cm	1	115	26	0
	110 cm	3	110	28	0
	180 cm	3	435	46	0
Second prélèvement 06-9-80 (+11 jours après premier apport)	30 cm	1	150	73	0.065
		4	70	63	0
		7	50	63	0.052
	60 cm	1	150	87	0.022
		3	345	49	0.035
		4	160	58	0
	110 cm	1	400	20	0
		3	360	28	0
	180 cm	3	1515	40	0
Troisième prélèvement 13-9-90 (juste avant deuxième apport d'engrais azoté) (+ 48 jours après premier apport)	30 cm	1	285	12	1.187
		4	100	11	0.029
		7	130	12	0.044
		10	320	19	0.156
		11	330	17	0.366
	60 cm	3	340	4	0.072
		4	330	13	0.026
	110 cm	1	220	10	0.099
		3	250	46	0.017
	180 cm	3	1200	32	0

Première pluie : 6-08-80 Germination: 7.08.80 récolte : 27-10-80
Apports engrais : . 30 kg N ha^{-1} le 26-08-80
(E % = 2.04) . 30 kg N ha^{-1} le 13-09-80
Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions

une forte percolation et une lixiviation de l'azote du sol en profondeur (tableau 12) estimée à environ 10 kg N ha^{-1} au 13-09 (VACHAUD 1981). A partir de la mi-septembre (soit 40 jours aprés le semis), le taux de variation du stock hydrique devient négatif, ce qui correspond à une bonne implantation du système racinaire et à l'arrêt des pluies (VACHAUD *et al.* 1982). Pour cette raison, après le 13-09, aucune des cellules de prélèvement, jusqu'à 180 cm, n'a fourni de solution. Ceci nous permet d'avancer : (1) que seul le premier apport d'azote a été affecté par la lixiviation ; (2) que le second apport d'azote a été vraisemblablement très peu utilisé par le mil, d'où le faible CRU de 27,6 % (tableau 13) ; en revanche, le CRU du premier apport de 30 N, non mesuré, serait élevé, de l'ordre de 50 %.

Sous une pluviométrie normale en quantité et en répartition cette année-là (quoiqu'excédentaire par rapport à la moyenne des dix dernières années), la descente du front d'azote 15 s'est faite jusqu'au 20ème jour après l'apport d'engrais, à raison de 5 à 7 cm $jour^{-1}$: au 11ème jour, la profondeur de 60 cm était atteinte ; au 18ème jour (aprés le premier apport d'engrais), soit 37 jours après la germination, la profondeur de 110 cm était atteinte. Or, à cette date (40ème jour environ) et jusqu'à plus de 100 cm de profondeur, le mil colonise bien le sol (CHOPART 1980) d'où les chances d'une utilisation optimale de l'azote apporté au démariage, contrairement à l'apport à la montaison pour les raisons évoquées ci-dessus.

Ces résultats montrent l'efficacité de l'apport d'azote au démariage et les risques d'inefficacité sur la plante de l'apport d'azote à la montaison (mais ne traduisant pas nécessairement une faible efficicence réelle selon la définition que nous en avons donnée page 54).

L'arrêt précoce des pluies avant l'apport d'azote à la montaison ayant fortement réduit sinon empêché l'utilisation de cet azote, ne permet pas de calculer la valeur A sur la base de 60 kg N ha^{-1} d'engrais azoté apporté ; sur la base de 30 kg N ha^{-1} (seul apport vraisemblablement utilisé pour le mil), la valeur A serait de 172 kg N ha^{-1} équivalent sulfate, cohérente avec celle obtenue dans les expériences précédentes. La fourniture d'azote par le sol est élevée : 97 kg N ha^{-1}, soit 85 % de l'azote total de la plante (tableau 13).

IV.2.3.2 - Profondeur de lixiviation de l'engrais

En absence de dispositifs de capteurs de solution du sol ou de cases lysimétriques, la lixiviation est difficile à mesurer en terme de profondeur et de quantité. La mesure de l'immobilisation de l'azote engrais en sens large (voir glossaire) nous permet cependant de connaître avec une relative précision la quantité d'azote engrais lixiviée et éventuellement immobilisée au-delà d'une profondeur donnée. Elle a été étudiée aux paragraphes IV.2.1.3 page 97 pour Bambey et Séfa, et IV.2.2.2 page 110 pour Nioro. Sous pluviométrie inférieure à 700 mm à Bambey sous mil et à Nioro sous maïs, moins de 5 % de l'azote engrais sont

Tableau 13: Quantité et pourcentage de l'azote 15 provenant de l'engrais marqué retrouvé dans le mil variété souna III. Bambey, essai III.

	Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E %	% NdfF	Q ^{15}N g ha^{-1}	CRU %
Grains	1996	42.6	0.333	16.3	142.02	11.3
Rachis + glumes	1241	15.9	0.331	16.2	52.59	4.2
Tiges + feuilles	6167	55.9	0.272	13.3	151.98	12.1
Plante entière (CV %)	9404 (4.8)	114.5 (17.8)	0.303	14.9	346.6	27.6 (10.5)

Azote apporté : 60 kg N ha^{-1} E % = 2.04 $Q^{15}N$ départ = 1 257.16 g ha^{-1}

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

retrouvés au delà de 80 cm : 3 % à Bambey et 4 % à Nioro ; à cet égard, notons qu'à Bambey, dans l'essai III relaté dans le paragraphe précédent, le front azote 15 n'a pas dépassé 110 cm de profondeur. Sous une pluviométrie supérieure à 700 mm, à Séfa, de l'azote engrais est retrouvé dans l'horizon 120-150 cm mais en quantité trés faible (moins de 5 %).

IV.2.3.3 - Conclusion

L'étude de la lixiviation de l'azote 15 montre les risques de faible utilisation par le mil du deuxième apport d'azote au stade fin montaison - début épiaison, en raison d'une réduction - voire d'un arrêt - du drainage de l'eau en profondeur ; ce phénomène trés probable dés le début de l'épiaison, correspond à la période où les besoins en eau sont les plus importants, de l'épiaison jusqu'à la floraison (DANCETTE 1973). Ces risques sont réduits sur maïs en raison d'une pluviométrie supérieure dans la zone où cette plante peut être cultivée.

IV.2.4. Volatilisation de l'engrais.
Essai en milieu contrôlé

Avant d'aborder l'étude de la volatilisation de l'engrais dans les conditions de culture des sols sableux tropicaux, nous ferons un bref historique sur l'évolution des idées et des travaux depuis deux décennies, relatifs aux pertes d'azote dans l'atmosphère.

Dans les sols sableux tropicaux, les pertes par lixiviation n'expliquent pas la faible utilisation de l'azote par les plantes. Pour cela, BLONDEL (1967) a émis l'hypothèse d'une possible volatilisation de l'ammoniac à partir de l'urée ; celle-ci, en effet, est apportée dans toute la zone du Sénégal en couverture ; elle est ammonifiée rapidement et quelques jours après le traitement, la teneur en azote ammoniacal augmente dans l'horizon de surface.

Pour vérifier cette hypothèse, cet auteur a entrepris de mesurer directement les pertes par volatilisation. Le sol est alors couvert par une cloche contenant une coupelle avec de l'acide sulfurique dans le but de fixer l'ammoniac dégagé.

Malgré des conditions favorables à des pertes d'azote par volatilisation - température élevée, humidité, faible capacité d'échange - BLONDEL ne mesure que des pertes négligeables.

Par la suite, vers les années 1980, nos résultats expérimentaux au champ font état d'un bilan azote 15 engrais compris entre -20 et -50 % (tableau 16). Ce déficit est attribué à des pertes dans l'atmosphère. Considérant d'une part ces résultats et d'autre part les résultats de BLONDEL (1967) qui conclut à des pertes négligeables par volatilisation, nous sommes conduits à invoquer la dénitrification (GANRY *et al.* 1978). Cependant, des expériences

ultérieures nous conduisent à remettre en question cette hypothèse, la dénitrification ne pouvant expliquer à elle seule les pertes importantes sur témoin.

Si l'accroissement des pertes d'azote engrais enregistrées en présence de pailles enfouies pouvait raisonnablement être attribué à la dénitrification (GANRY *et al.* 1978 ; GUIRAUD 1984), en revanche nous avions de fortes présomptions pour attribuer les pertes sur le témoin sans paille, à la volatilisation sous forme ammoniacale (SOCHTIG 1978 ; WETSELAAR et GANRY 1982).

Reprenant alors les résultats de BLONDEL, en calculant la quantité d'acide utilisée, nous avons vu que la concentration de l'acide était trop faible ; par ailleurs, en raison de la couverture du sol par une cloche, une rediffusion de l'ammoniac dans le sol a pu se produire.

L'ensemble de ces raisons (faible CRU, pertes élevées dans l'atmosphère) nous a amené à réétudier le processus de volatilisation.

En sols sableux tropicaux, généralement acides, les pertes par volatilisation d'ammoniac gazeux se produisent surtout à partir de l'urée. Ce processus requiert : (I) l'activation de l'hydrolyse de l'urée et l'accumulation d'azote ammoniacal, (II) des conditions pour un faible rapport NH_4^+/NH_3. Le facteur essentiel influençant ce rapport est le pH de la solution du sol parce qu'il affecte l'équilibre représenté par l'équation suivante (FRENEY *et al.* 1981) :

$$NH_4^+ + OH^- \rightleftharpoons NH_3 + H_2O$$

Plus le pH est élevé, plus bas est le rapport $\frac{NH_4^+}{NH_3}$

D'autres facteurs influencent ce rapport, comme la capacité d'échange du sol, la température de la solution du sol et la dessiccation (VLEK et STUMPE 1978).

Lorsque l'urée est appliquée en surface, les conditions I et II sont réalisées ; en effet, l'activité uréasique induit une augmentation de pH d'autant plus forte que le pouvoir tampon du sol est réduit (C.E.C. < 5 meq 100 g^{-1} dans la majorité des sols sableux).

Le flux d'ammoniac dans l'atmosphère est positivement relié à la vitesse de l'air à la surface du sol (FRENEY *et al.* 1981) raison pour laquelle nos études sur la volatilisation ont porté sur un système ouvert (voir figure 21).

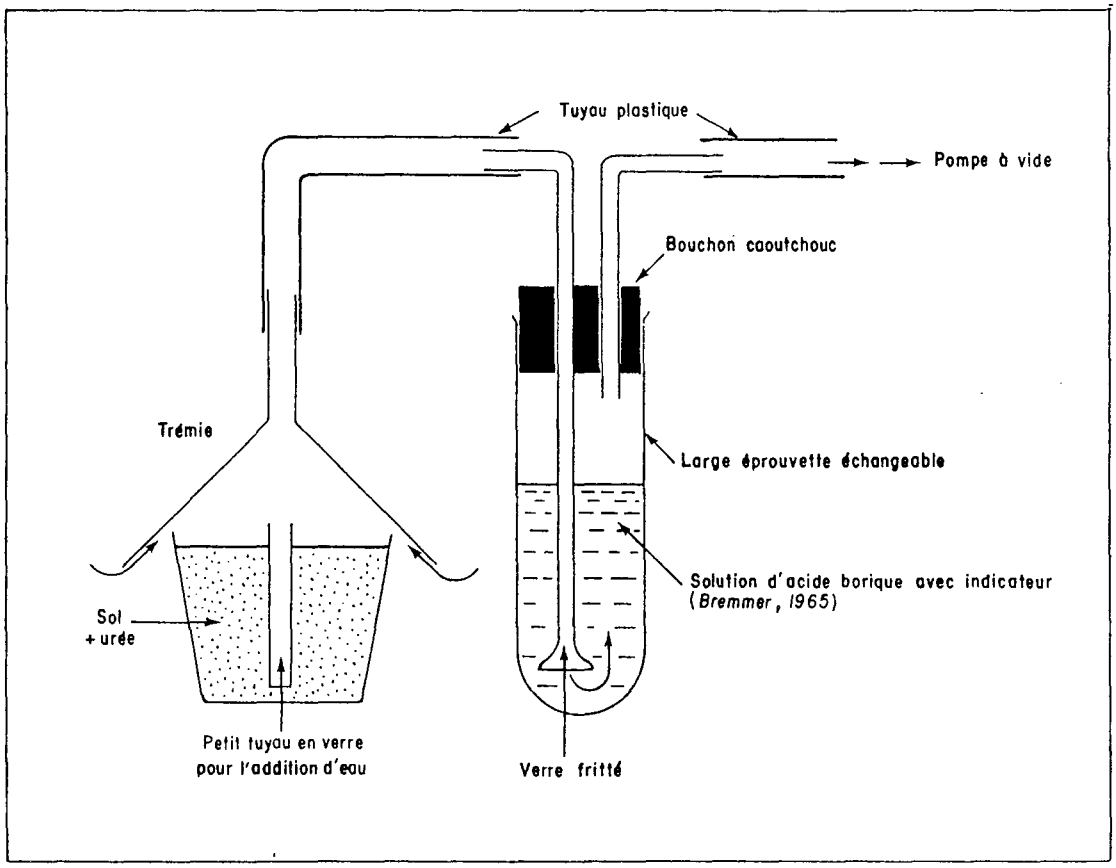


Figure 21 : Schéma du système utilisé en milieu contrôlé pour la détermination des pertes par volatilisation d'ammoniac à partir de l'urée ajoutée.

Nos essais ont été réalisés dans un dispositif de piégeage de l'ammoniac dans une solution d'acide borique (figure 21), à Bambey, dans l'atmosphère ambiante du laboratoire qui varie assez peu en saison des pluies (25° C < Θ < 30° C ; 70 % < hygrométrie < 90 %). Une pompe à faire le vide doit procurer un courant d'air suffisant pour simuler le mouvement d'air du vent. La pompe à vide est rattachée à trois ou quatre de ces dispositifs, l'ensemble étant généralement constitué d'un témoin et de deux à trois traitements. Les répétitions ont été opérées dans le temps. On simule les conditions de la parcelle, en utilisant un pot en plastique contenant 500 g de sol d'une surface de 46.53 cm^2, non cultivé durant l'expérience, dans lequel est placé un petit tuyau en verre pour l'addition d'eau dans le but de maintenir les conditions d'humidité comprises entre la capacité au champ et la capacité de rétention. Ensuite, on ajoute 10 ml de solution d'urée contenant 46.53 mg d'azote, correspondant à 100 kg ha^{-1} d'azote urée. La titration de la solution d'acide borique dans l'éprouvette se fait périodiquement, généralement tous les jours avec de l'acide sulfurique 0,02 N. Les expériences ont duré entre 139 h et 244 h.

IV.2.4.1 - Facteur sol

Quatre types de sol ont été étudiés : (a) un sol ferrugineux tropical peu lessivé de Bambey appelé localement "dior", (b) un autre sol de Bambey intermédiaire entre le sol ferrugineux tropical et le vertisol, appelé localement "dek", (c) un sol vertique appelé localement "argiles noires" formé sur marnes calcaires, prélevé dans la région de Sébikotane (50 km à l'Est de Dakar), (d) un sol de Séfa (Sud Sénégal) ferrugineux tropical lessivé à tache et à concrétion appelé localement "beige". La caractérisation de ces sols figure au tableau 1 page 34.

Moins le sol est argileux, plus intense est la volatilisation. Le pourcentage d'azote engrais volatilisé, respectivement pour les sols de Bambey "dior" et "dek", de Séfa et de Sébikotane, est respectivement de 40 %, 22 %, 20 % et 15 % (tableau 14).

IV.2.4.2 - Facteur placement

L'enfouissement de l'urée dans le sol réduit significativement les pertes à partir de 1.5 cm de la surface. La proportion de l'azote urée volatilisée est respectivement pour l'urée en surface, enfouie à 1.5 cm, enfouie à 2.5 cm, enfouie à 3.5 cm et enfouie à 5 cm, de 41 %, 19 %, 10 %, 4 % et 0 % (tableau 15)

IV.2.4.3 - Facteur dose

La volatilisation est liée positivement à la dose d'azote urée appliquée. Sur la base du pourcentage d'azote urée volatilisé, cette relation semble répondre à une loi des

Tableau 14 : Proportion d'azote urée volatilisé après application d'urée en surface (100 N) dans différents sols caractérisés par leur teneur en argile, leur capacité totale d'échange (T) et leur pH

Origine des sols	argile %	C.E.C (T) meq 100 g^{-1}	pH eau	% N-urée volatilisé
Bambey "dior"	4.0	2.2	6.2	41 % (± 2)
Bambey "dek"	6.5	4.6	7.2	22 % (± 2)
Séfa "beige"	12.2	2.7	5.9	20 % (± 3)
Sébikotane "noir"	42.0	50.5	7.4	15 % (± 3)

Entre parenthèse figure l'écart type de la moyenne.

Tableau 15 : Proportion d'azote urée volatilisé après application d'urée (100 N) à différentes profondeurs en sol sableux dior de Bambey.

Profondeur d'incorporation	% N-urée
Surface	41 % (± 2)
1.5 cm	19 % (± 3)
2.5 cm	10 % (± 1)
3.5 cm	4 % (± 1)
5 cm	0 %

Entre parenthèse figure l'écart type de la moyenne.

accroissements moins que proportionnels. Sur la base des quantités d'azote urée volatilisées, cette relation apparaît linéaire (figure 22) impliquant pour la précédente, une relation de nature hyperbolique. Ces résultats sont en accord avec ceux cités par FAURIE (1980).

IV.2.4.4 Discussions - conclusions

Les valeurs calculées sont proches des valeurs observées en mini-lysimètres ; elles diffèrent avec les valeurs observées au champ : inférieures pour la dose 30 N et supérieures pour les doses 60 et 90 N, mais dans l'ensemble demeurent cohérentes (tableau 16).

La figure 22 permet de préciser les limites de volatilisation : sa limite supérieure serait de 55 % de l'azote urée apporté et sa limite inférieure correspondrait à la dose de 25 kg azote urée ha^{-1}. En d'autres termes, en sols sableux "dior", la volatilisation ne dépasserait jamais 55 % de la dose d'urée appliquée et ne se déclencherait qu'à partir de la dose de 25 kg d'urée ha^{-1}.

Il importe de noter que tous les essais ont été conduits avec de l'urée en solution, non marquée. Une expérience comparant l'urée en granulés et en solution à la dose 100 N montre peu de différence dans l'azote volatilisé hormis une cinétique plus rapide pour l'urée en solution. Il est cependant vraisemblable qu'aux doses faibles, l'urée sous forme de granulés induira une volatilisation plus importante en raison de la concentration élevée en urée au niveau du granulé, identique quelle que soit la dose épandue.

Tableau 16 : Pourcentages des pertes d'azote urée calculés par la relation établie figure 22 et mesurés in situ au champ et en minilysimètres en sol sableux "dior" de Bambey.

Dose N kg ha^{-1}	Calculé	Mesuré au champ	Mesuré en minilysimètres
30	7	17 (1)	-
60	31	24 (2)	-
90	39	27 (1)	39 (3)
120	43	45 (2)	48(4) et 45(3)

(1) Essai I ; (2) GANRY et GUIRAUD, non publié ; (3) GANRY et al. 1978 ; (4) GANRY et GUIRAUD 1979

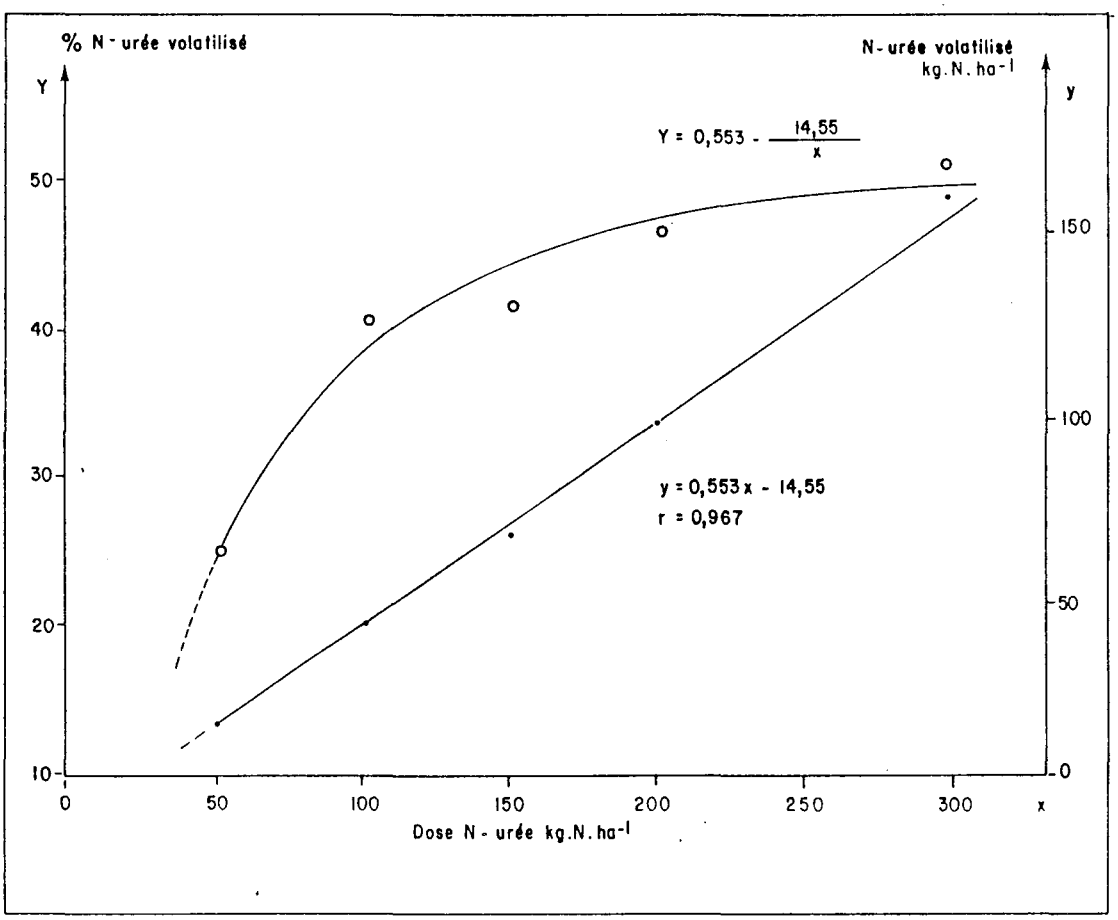


Figure 22 : Volatilisation ammoniacale de l'urée en fonction de la dose appliquée - Essais en milieu contrôlé.

IV.3 - OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE L'AZOTE

A l'issue de cette analyse de la productivité du système tel qu'il existe actuellement, faite en relation avec la quantification des principaux flux d'azote, nous nous proposons de répondre à deux questions capitales : pourquoi optimiser et comment optimiser ?.

Rappelons nos trois objectifs interdépendants : accroître la productivité du sol, économiser au maximum l'engrais azoté et maintenir la fertilité du sol. Mais avant d'aborder notre propre analyse, nous mentionnerons les principaux résultats obtenus par BLONDEL (1971) et les hypothèses et recommandations qui en découlèrent dans le but d'accroître la production de la céréale. Obtenus sans le recours aux méthodes isotopiques, les résultats de BLONDEL sont essentiellement qualitatifs mais leur mérite est d'avoir précisé, il y a plus de vingt ans, les principaux facteurs "azote" et "plante" déterminant le rendement en grains de la céréale. On peut les résumer dans l'équation suivante :

Rendement de la céréale = f (a, b, c, d, e, f, g)
dans laquelle :

a = quantité d'azote minéralisable
b = cinétique de la minéralisation
c = dose d'engrais
d = méthode d'apport
e = longueur du cycle
f = indice de rendement corrélé à l'indice d'efficience de l'azote
g = ensemble des autres facteurs.

Voici les principales conclusions émises par BLONDEL (1971), lesquelles renvoient aux facteurs ci-dessus indiqués :

1 - l'alimentation azotée du maïs n'est pas limitée par le stock initial d'azote minéralisable du sol mais par sa vitesse de minéralisation (a et b);

2 - la vitesse de minéralisation serait trop faible pour assurer une fourniture d'azote suffisante aux stades critiques (montaison et épiaison) de développement du maïs (b) ;

3 - il est possible d'atteindre le potentiel de production du mil à cycle long sans apport de fumure azotée (c) ;

4 - par contre, on ne peut atteindre le maximum de rendement du maïs que si l'on apporte une fumure azotée suffisante et bien répartie suivant les phases de développement (c et d) ;

5 - par la fumure azotée, on obtient sur maïs des plus-values en grain très importantes, car l'indice d'efficience de l'azote absorbé est plus élevé (c et f) ;

6 - on obtient, dans les essais de fertilisation à Bambey, des accroissements de rendement importants consécutifs à l'apport d'azote sur la variété à cycle court, alors qu'ils sont souvent négligeables sur la variété à cycle long (e).

De l'analyse faite dans la conclusion du paragraphe IV.2.1 page 106) et des travaux de BLONDEL rappelés ci-dessus, il apparait possible de perfectionner les systèmes actuels que nous venons d'étudier : (I) d'abord en augmentant le rendement des témoins zéro azote ; en effet, SCORAILLE (1987) a clairement montré pour le blé en France que rendement témoin et rendement maximal sont corrélés positivement ; nous faisons l'hypothèse qu'il en est de même pour les céréales tropicales ; (II) ensuite, en accroissant les ressources azotées du système et en optimisant le fonctionnement interne dudit système : fumure azotée minérale et organique, stimulation du cycle interne de l'azote, meilleure adéquation de l'offre par le sol et de la demande par la plante, diminution des pertes d'azote engrais. PICHOT (1975) abonde dans le même sens en identifiant quatre facteurs qui régissent la fourniture d'azote par le sol: un facteur intensité (teneur du sol en azote minéral), un facteur cinétique (vitesse de minéralisation), un facteur quantité (réserves du sol en azote utilisable) et un facteur diffusion de l'azote.

Pour le système mil-sol ferrugineux peu lessivé, l'accroissement de productivité semble étroitement lié à la capacité du sol à fournir l'azote (stock d'azote minéralisable, activité ammonifiante et nitrifiante) ; même l'engrais azoté, mal utilisé directement, transite en grande partie par le compartiment organique du sol **d'où la voie d'optimisation envisagée et réalisée : les apports réguliers de matière organique** pour leur rôle de support de l'activité minéralisatrice et de source d'azote minéralisable. On comprend dès lors la nécessité d'apprécier l'utilisation de l'engrais sur le critère de son efficience réelle.

Pour le système maïs-sol ferrugineux lessivé, l'accroissement de productivité semble lié autant à l'engrais qu'au sol (% NdfF = % NdfS) ; cependant les résultats de BLONDEL (rappelés ci-dessus), ainsi que la forte productivité de l'unité d'azote engrais et le % NdfF relativement élevé que nous avons observés, nous font accorder la primauté à l'engrais, mais sans perdre de vue que le sol peut couvrir 50 % des besoins azotés du maïs, d'où les deux voies d'optimisation envisagées et réalisées : **la technique de placement de l'engrais** et **l'amendement organique par le compost** (la première seulement fait l'objet du présent mémoire dans le cas du maïs).

IV.3.1. L'enfouissement de paille est-il bénéfique ?

Essai au champ I.

L'effet annuel de l'enfouissement des pailles sur la production végétale est conditionné essentiellement par quatre facteurs :

- deux facteurs intrinsèques : le C/N et la composition en acides organiques solubles des pailles ;

- deux facteurs du milieu : l'humidité du sol au moment de l'enfouissement et les alternances humectation-dessication en cours de cycle.

Dans l'essai II, la décomposition s'est amorcée après enfouissement en fin de saison des pluies précédentes, et a pu se poursuivre l'année de la culture en début de saison des pluies, avant le semis, en raison du démarrage précoce de la saison des pluies (voir figure 2 A en annexe).

L'amorce de cette décomposition qui a précédé le semis du mil, présente un intérêt majeur dans la réussite de la culture, comme nous allons le voir.

Les résultats sont présentés au tableau 17.

L'enfouissement de paille dans le sol accroît le rendement matière sèche de la paille de mil de 31 %, sans effet sur le rendement en grains. Le CRU sur parcelle témoin (sans enfouissement de paille) est de 23,2 %, identique à celui trouvé dans l'essai I (tableau 6, page 95) ; il augmente, mais non significativement, sous l'action de l'enfouissement de paille, passant de 23,2 à 28,6 % (tableau 17). La valeur A sur parcelle témoin est de 164 kg ha^{-1} équivalent urée (tableau 18) ; ce résultat est cohérent avec celui obtenu dans l'essai I de 185 kg N ha^{-1} (tableau 9, page 104), supérieur dans l'essai I, en raison vraisemblablement d'un effet cumulatif de la dose d'engrais azoté. L 'enfouissement de paille ne modifie donc pas la valeur A (tableau 18).

L'azote du sol (NdfS) est prépondérant dans la nutrition azotée de la céréale : 39 kg N ha^{-1}, soit prés de 2 fois plus que la part de l'engrais ; le NdfS et le NdfF sont accrus significativement de 19 % sous l'action de la paille. On notera que cet effet positif de la paille n'est pas lié à un accroissement de la valeur A : tout se passe comme si le rendement avait été augmenté sous l'action de la paille sans que celle-ci n'enrichisse le pool d'azote minéralisable du sol, la plante absorbant l'azote sol (NdfS) et l'azote engrais (NdfF) dans le même rapport (NdfS/NdfF) que dans le témoin, ce que traduit la non variation de l'excès isotopique. Trois hypothèses peuvent être retenues pour expliquer ce résultat, qu'on raisonnera à partir de l'équation 16 page 63, qui peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{NdfS}{NdfF} = k \; Asol$$

Tableau 17 : Quantité et pourcentage de l'azote 15 provenant de l'engrais marqué retrouvé dans le mil variété syn. 1. Bambey, essai II.

Traitement enfouissement	Grains						Pailles + rachis + glumes						Plante entière					
	Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E%	% NdfF	$Q^{15}N$ g ha^{-1}	CRU %	Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E%	% NdfF	$Q^{15}N$ g ha^{-1}	CRU %	Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E%	% NdfF	$Q^{15}N$ g ha^{-1}	CRU %
0	1473 a	23.40 a	0.373	34.3	87.38	9.0 a	4047 a	37.0 a	0.390	35.8	144.39	14.8 a	5520 a	60.42 a	0.384	35.2	231.77a	23.2 a
Paille	1506 a	27.45 a	0.351	32.2	96.34	9.9 a	5295 b	44.6 b	0.408	37.4	181.78	18.7 ab	6801 b	72.04 b	0.386	35.4	278.12b	28.6ab
Compost	1546 a	25.50 a	0.361	33.1	92.07	9.5 a	5630 b	54.3 c	0.355	32.6	192.97	19.8 b	7176 b	79.82 c	0.357	32.8	285.04b	29.3 b
C.V.	9 %	8 %			18 %	18 %	7 %	11 %			18 %	18 %	8 %	10 %			15 %	15 %

Les valeur affectées d'une même lettre ne différent pas significativement au test de Newman et Keuls P = 0,005.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 18 : Valeur A et fourniture d'azote par le sol - Mil variété syn. 1 - Bambey, essai II.

Enfouissement	N total plante entière kg N ha^{-1}	NdfF kg N ha^{-1}	NdfS kg N ha^{-1}	Valeur "A" kg ha^{-1} équivalent urée
0	60.4	21.2	39.2	164
Paille	72.0 (+ 19 %)	25.5 (+ 19 %)	46.5 (+ 19 %)	163
Compost	79.8 (+ 32 %)	26.1 (+ 23 %)	53.7 (+ 37 %)	185

Apport N : 89.2 kg N ha^{-1} E % = 1.09

Hypothése (1) : amélioration du système racinaire qui expliquerait l'augmentation de NdfS et NdfF. Mais comment expliquer la non variation du rapport NdfS/NdfF donc de la valeur A, alors que l'on a accru le pool d'azote du sol par le fait même de l'apport de paille?

Hypothèse (2) : absence d'effet de l'apport de paille sur le pool d'azote minéralisable du sol. Cette hypothèse est peu vraisemblable du fait que la paille enfouie contribue peu ou prou à l'alimentation du mil (dans une expérience lysimétrique non relatée ici, utilisant la paille marquée, nous avons trouvé une contribution à l'azote total de la plante de 10 %).

Hypothèse (3) : diminution du pool d'azote minéralisable du sol compensée par la fraction minéralisable de la paille, que deux causes peuvent expliquer :

- activation du cycle interne de l'azote, mais, par suite d'un accroissement relatif de l'immobilisation brute de l'azote, la minéralisation nette décroît ; ce processus est plausible et classique de surcroît suite à un enfouissement de paille ;

- pertes d'azote sol par dénitrification induite par l'enfouissement de paille, ce que nous avons montré dans une expérience similaire reproduite en lysimètres (GANRY *et al.* 1978) et confirmé par GUIRAUD (1984) en sols tempérés.

L'effet de la paille enfouie jugé sur le critère du rendement de la plante entière est donc bénéfique mais limité par les risques de phytotoxicité qui sont à craindre durant les vingt premiers jours de la décomposition (GANRY *et al* 1978) que nous venons d'évoquer ; jugé sur les critères de l'utilisation optimale de l'azote de l'engrais et du sol (voir les deux conditions définies au paragraphe III.2.3. page 67), **l'enfouissement de paille induit seulement un accroissement du CRU mais ne modifie pas la valeur A, donc le pool d'azote minéralisable du sol.** En ce qui concerne le NiS, nous référant à un résultat obtenu antérieurement dans un essai en lysimètres (GANRY *et al.* 1978), nous faisons l'hypothèse que celui-ci n'est pas modifiée.

L'effet positif de l'enfouissement des pailles sur l'économie de l'azote serait donc de portée limitée : l'accroissement des NdfF et NdfS observé serait la conséquence de l'accroissement du rendement de la plante entière (tableau 18) ; de plus, **cet enfouissement présente le risque d'être gravement préjudiciable au rendement et à l'économie d'azote s'il n'est pas réalisé dans les conditions définies plus haut.**

IV.3.2. Le compostage de la paille améliore-t-il l'efficience de l'azote ?

Essai au champ II

Les difficultés de restitutions directes au sol des résidus végétaux dans les exploitations, difficultés auxquelles s'est heurté la vulgarisation du labour d'enfouissement des pailles, et dont nous avons déjà tenté une analyse (GANRY *et al.* 1978), nous ont amené à étudier la restitution, différée, de résidus transformés. De ce fait, les thèmes de recherche relatifs à l'optimisation des rendements et du bilan azoté dans l'exploitation, par les techniques d'apport de fumier et/ou de compost, sont devenus essentiels et ont conduit à l'étude des processus de compostage semi-anaérobie et anaérobie (biogaz).

Un certain nombre de propriétés communes caractérisent les composts de paille de céréales et les fumiers pailleux compostés :

- immobilisation importante d'azote (GANRY et SARR 1983) ;
- accroissement des apports au sol de précurseurs de substances humiques (DOMMERGUES 1972) ;
- homogénéisation du matériel végétal de départ ;
- suppression des risques d'effet phytodépressif (GANRY *et al.* 1978) ;
- suppression des germes pathogènes (essais en cours concernant le mildiou du mil).

L'ensemble de ces propriétés et en particulier les deux premières pour notre objectif d'optimisation de l'utilisation de l'azote, nous a conduit à étudier le compost, et pour cela à vaincre bien des réticences opposées à l'utilisation de ce produit alors pratiquement inexistant en milieu rural il y a une dizaine d'années, et à notre connaissance maintenant en voie de développement au Sud du Mali et Sud du Sénégal (voir introduction, page 21).

Les résultats sont présentés au tableau 17.

L'augmentation de rendement de la plante entière résultant de l'enfouissement de paille compostée est supérieure à celle enregistrée pour la paille ; elle demeure cependant très faible et non significative sur les grains. Le N total de la plante suit la même variation : il est accru significativement de 23 % sous l'action du compost contre 19 % sous l'action de la paille, l'effet positif du compost par rapport à la paille étant lui même significatif. Le CRU % avec compost est supérieur de + 26 % au CRU % sur témoin ; cependant, il ne diffère pas du CRU % avec paille, contrairement au N total, en raison d'un effet inverse du compost sur l'excès isotopique dans la plante, effet confirmé et encore plus accentué, dans l'essai I après plusieurs années d'apport de compost au sol (tableau 5 A en annexe). Cette baisse de l'excès isotopique dans la plante se traduit par un accroissement significatif de la valeur A qui passe de 165 à 185 Kg N ha^{-1}. **Comparé à la paille, le compost permet donc d'accroître le pool d'azote mobilisable du sol et sa disponibilité pour la plante** (tableau 18, page 135).

L'effet du compost jugé sur le critère du rendement de la plante entière est donc, comme pour la paille, bénéfique, mais sans les risques d'effets phytodépressifs, ceux-ci étant anihilés par le compostage (GANRY 1978). Jugé sur les critères de l'utilisation optimale de l'azote de l'engrais et du sol, cet effet est positif (tableau 18) car il satisfait à la relation :

$$\frac{ab}{a-b} < 100 \quad \text{avec } a > b, \qquad \text{(équation 20 page 68)}$$

stipulant que l'accroissement de la valeur A est cohérente avec l'accroissement du CRU %. Effectivement, a = ▲ N total plante = 32, et b = ▲ excès isotopique = 7, vérifient cette relation (tableau 17 page 134).

IV.3.3. L'effet du compost est-il accru par les applications répétées ?

Essai au champ I

Nous venons de mettre en évidence dans l'essai II, trois résultats importants :

1 - les CRU sont accrus par la fumure organique (paille ou compost) mais non modifiés par la forme de celle-ci (paille ou compost) ;

2 - Les NdfS sont accrus par les deux formes de matière organique, mais deux fois plus par le compost que par la paille ;

3 - la valeur A est accrue par le compost mais non par la paille.

Ces résultats d'essais annuels n'autorisent pas à conclure quant aux effets cumulatifs; ils suggèrent cependant les avantages probables du compost sur la paille et pourraient expliquer l'insuffisance de la fumure organique par la paille dans le maintien de la fertilité du sol déjà signalée par PICHOT *et al* (1981) et PIERI (1985).

Dans l'essai au champ I, on étudie l'effet des applications répétées de compost. Pour la lecture des résultats, on se reportera aux tableaux 6, 8 et 9 pages 95, 102 et 104.

L'étude statistique des courbes de réponse du mil aux doses croissantes d'urée en absence et en présence de compost, en raison de l'interaction non significative, permet d'admettre deux équations quadratiques identiques en ce qui concerne les termes du second degré "a" et du premier degré "b", mais différentes en ce qui concerne le terme constant "c" qui traduit l'effet du compost (figure 8 page 88).

L'accroissement de rendement du mil dû à l'apport de compost, calculé à partir des équations évoquées ci-dessus, est de 300 kg M.S de grain ha^{-1} quelle que soit la dose d'urée apportée.

Le N total en cours de cycle est accru significativement sous l'effet du compost surtout aprés la floraison (figure 12b page 94) .

Les CRU subissent la même dépression en cours de cycle que sur le témoin sans compost ; leur remontée est cependant plus rapide en présence de compost : 13 points contre 10, entre le 47ème et le 79ème jour (figure 12b page 94).

Cependant les CRU finals sont peu augmentés sous l'action du compost (27 % contre 24 %) en raison de la variation inverse de N total et de l'excès isotopique, évoquée au paragraphe IV.3.2 page 137 (tableau 8 page 102) .

Le NiS est accru significativement mais cet accroissement reste cependant faible (tableau 8 page 102).

L'efficience réelle approchée par excès de l'azote engrais (CRU % + NiS %) est légèrement accrue ; elle est respectivement pour les doses de 30 N et de 90 N, de 90 % contre 80 % sans compost, de 78 % contre 72 % sans compost (tableau 8 page 102).

Selon l'inéquation 14 page 54, l'efficience réelle peut être estimée dans l'intervalle suivant:

72 % < Efficience urée 30 N sans compost < 80 %

74 % < Efficience urée 30 N avec compost < 90 %

64 % < Efficience urée 90 N sans compost < 72 %

67 % < Efficience urée 90 N avec compost < 78 %

L'efficience réelle de l'urée apportée à faible dose (30 N) et à forte dose (90 N) est légèrement accrue par l'apport de compost.

Les pertes d'azote engrais sont attribuées essentiellement à la volatilisation (paragraphe IV.2.4 page 120) : celles-ci sont donc diminuées sous l'action du compost de 3 kg N ha^{-1} à 30 N et de 5 kg N ha^{-1} à 90 N (tableau 9 page 104).

En ce qui concerne la valeur A et la contribution du sol à la nutrition azotée de la plante, deux résultats importants se dégagent : (I) l'apport de compost accroît sensiblement les valeurs A quelle que soit la dose d'azote engrais apportée ; (II) l'azote sol est prépondérant dans la nutrition azotée de la céréale et fortement accru sous l'action du compost (tableau 9 page 104).

De 145 et 185 kg N ha^{-1} équivalent urée les valeurs A passent à 250 et 295 kg N ha^{-1} équivalent urée sous l'action du compost, respectivement pour la dose 30 N et la dose 90 N. Comparées aux 185 kg N ha^{-1} obtenus sous l'action du compost en effet direct et annuel dans l'essai II, **ces valeurs traduisent un effet hautement positif des applications répétées de compost sur le pool d'azote du sol** qu'il est intéressant de relier à l'effet sur l'azote total du sol que nous avons mis en évidence par l'analyse chimique. En effet, aprés quatre années de monoculture de mil, on enregistre une nette supériorité de la teneur en azote total du sol des parcelles avec compost comparativement aux parcelles sans compost : 0,030% versus 0,021 % à la fumure de 90 N dans l'horizon 0-20 cm (tableau 9 A en annexe). Ces résultats confirment ceux obtenus par GIGOU (1982) au Nord-Cameroun qui montre que le stock d'azote total du sol ne se maintient qu'en présence de compost de paille de sorgho.

La fourniture d'azote sol (NdfS = y) est corrélée positivement à la dose d'engrais x (figure 23). La relation s'apparente à une droite d'équation $y = 0,3\ x + 20$. Le compost accroît la fourniture d'azote de la même quantité à 0 N et à 30 N (+ 17 kg N ha^{-1}) soit + 89% de la fourniture du sol au témoin. Cet accroissement est doublé à 90 N (+ 35 kg N ha^{-1}). Ces résultats mettent en évidence une interaction positive "urée x compost", à la dose d'azote urée optimale, sur la fourniture d'azote sol à la plante ; la formule permettant son calcul, indiquée par les statisticiens : 1/2 ("urée x compost" + "témoin") - 1/2 ("urée + "compost"), nous donne une interaction de + 9 kg N-sol ha^{-1}.

L'explication plausible de ces résultats résiderait dans l'action positive du compost en présence d'engrais azoté sur trois paramètres de l'agrosystème : (a) le bilan organique (FELLER et GANRY 1982), (b) la rémanence de la nitrification (SIBAND et GANRY 1976), (c) le développement racinaire dû à l'engrais azoté.

L'étalement de la nutrition azotée ainsi favorisé pourrait prolonger la végatation des talles. En d'autres termes, ces talles regresseraient moins vite sur la culture avec compost que

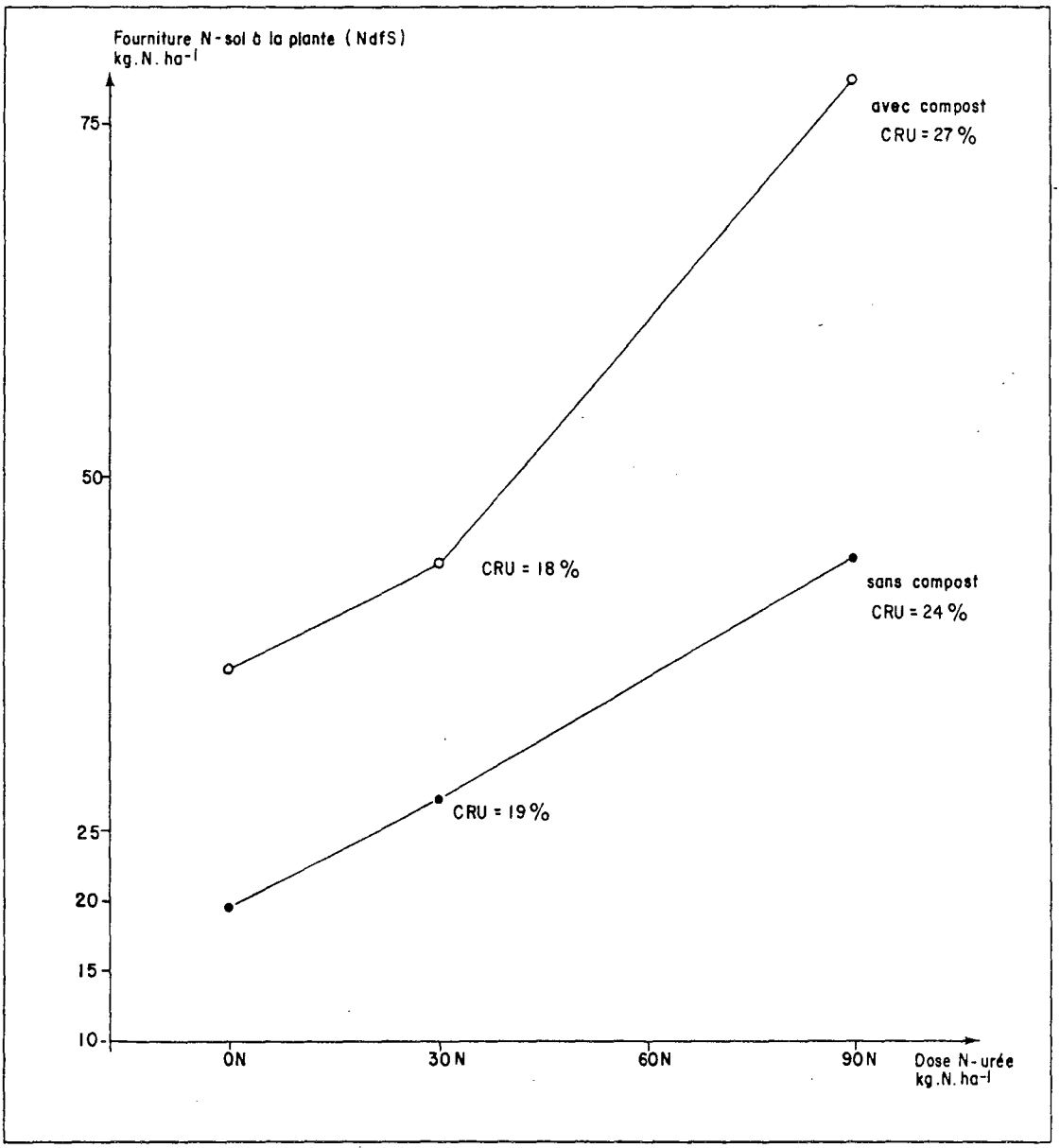


Figure 23 : Valeur de NdfS du mil sous l'action du compost et de l'urée. Bambey, essai au champ I.

sur la culture sans compost, expliquant donc l'effet de synergie observé sur la masse végétative (SIBAND, communication personnelle) et surtout expliquant pourquoi l'augmentation de rendement due à l'enfouissement de compost résulte uniquement de l'augmentation du nombre d'épis fertiles (talles fructifères) mais non du poids grains par épi et du poids de 1000 grains (GANRY et SARR 1983).

Jugé sur les critères de rendement et d'utilisation optimale de l'azote de l'engrais et du sol, l'effet des enfouissements répétés de compost est hautement positif et nettement supérieur à l'effet d'un apport unique. En fait ce résultat n'est pas surprenant étant donné que le compost est une matière organique pré-humifiée et compte tenu des résultats de l'essai II attestant son effet positif annuel sur la valeur A. En ce qui concerne l'enfouissement de paille, nous appuyant sur les résultats de l'essai II montrant une absence de l'effet de celui-ci sur la valeur A (paragraphe IV.3.1 page 133), en absence de données expérimentales d'essai longue durée, nous conclurons selon PIERI (1989) : "on se trouve dans la situation d'une sur-consommation de carbone organique qui induit en définitive un bilan du stock organique des sols négatif".

IV.3.4. Optimisation de la technique de placement de l'engrais.
Essais au champ V, VI, VII.

Dans une première phase, les agronomes se sont interessés aux faibles coefficients apparents d'utilisation (CAU) de l'azote engrais sur les céréales en milieu réel (voir paragraphe IV.2.4 page 120). L'application de la démarche scientifique décrite en introduction (page) conduisait BLONDEL **dans une seconde phase** (1967 et 1971 a, c, d) à reproduire le phénomène au laboratoire et en milieu contrôlé, **dans une troisième phase**, à des applications au champ, **et enfin** à la vulgarisation d'une technique de fertilisation azotée des céréales. Cette technique est toujours d'actualité.

C'est, alerté de nouveau par les médiocres résultats obtenus *in situ* certaines années que nous sommes revenus aux études en milieu contrôlé et semi-contrôlé pour reproduire le phénomène et reprendre l'analyse des mécanismes.

Le paragraphe IV.2.4 est consacré à cette étude. Nous y montrons comment un biais expérimental a pu conduire à une interprétation erronée. Le présent chapitre correspond à la phase de retour au champ pour l'étude des traitements susceptibles d'être vulgarisés (phase 4 dans notre démarche scientifique définie dans l'introduction). Les traitements appliqués *in situ* ont été conçus à partir des résultats des essais en milieu contrôlé interprétés au paragraphe IV.2.4 rappelés ci-dessus.

IV.3.4.1 - Etude économique de la fonction de production : rendement productivité et rentabilité de l'engrais

Différentes techniques de placement de l'urée sont étudiées à Séfa sur maïs dans les essais au champ V, VI et VII répétés dans le temps (1983, 1984 et 1985). Les résultats de rendement et de rentabilité de l'engrais sont schématisées aux figures 9 page 89, 10 page 90 et 11 page 91. Les équations des courbes de réponse du maïs aux doses croissantes d'urée dont les paramètres a, b et c figurent au tableau 19 permettent la mesure sur trois années des variables relatives au rendement, à la productivité et rentabilité de l'azote:

Rendement maximum (q M.S grain ha^{-1})

surface	22 < R < 25	m = 23
Bande	19 < R < 27	m = 23
Poquet	19 < R < 28	m = 24

Dose N maximum (kg N ha^{-1})

Surface	124 < N < 197	m = 165
Bande	123 < N < 197	m = 157
Poquet	158 < N < 164	m = 160

Productivité de l'unité d'azote à 30 N (kg M.S grain ha^{-1})

Surface	10 < P < 31	m = 23
Bande	16 < P < 28	m = 23
Poquet	19 < P < 31	m = 25

Productivité de l'unité d'azote à 100 N (kg M.S grain ha^{-1})

Surface	10 < P < 23	m = 17
Bande	16 < P < 20	m = 23
Poquet	19 < P < 31	m = 25

Optimum économique pour K = 7 (kg N ha^{-1})

Surface	93 < N < 120	m = 106
Bande	96 < N < 116	m = 109
Poquet	108 < N < 125	m = 116

Ces résultats mettent en évidence la supériorité des techniques de placement en localisation : en "poquet" et en "bande", par rapport à la technique en "surface", dans les conditions pédoclimatiques du sud du Sénégal (isohyète 1000 - 1200 mm, sols "beiges" ferrugineux tropicaux lessivés).

IV.3.4.2 - Coefficient réel d'utilisation de l'engrais (CRU)

Les CRU de l'azote de l'urée sont en moyenne, sur les trois années (tableau 7 page 96) ;

- pour l'apport en surface de 34 % (45, 31 et 24 %) ;
- pour la localisation en bande de 55 % (52, 55 et 47 %) ;
- pour la localisation en poquet de 56 % (62 et 51 %).

La localisation de l'urée en bande enfouie, par rapport à l'application en surface (application suivie d'un binage ou du buttage), accroît significativement le CRU, respectivement en 1983, 1984 et 1985, de + 35 %, + 76 % et + 96 %, donc proportionnellement plus que le rendement grain + paille, dont l'accroissement est + 25 %, + 21 % et 16 %.

IV.3.4.3 - Immobilisation de l'engrais (NiS)

Le mode de placement est sans effet sur le Nis %. Dans l'horizon 0 - 30 cm, il est en moyenne de 23 % de l'azote apporté, correspondant à 61 % du NiS dans l'ensemble du profil de sol sur 150 cm, ce que montrent les résultats ci-dessous :

- pour l'apport en surface, de 19 % (25,15 et 18 %) ;
- pour l'apport en bande, de 25 % (24, 27 et 23 %) ;
- pour l'apport en poquet, 25 % (30 et 20 %).

Les profils d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol sont presque semblables en 1983 et 1984 mais différents en 1985 (figures 14 page 99, 15 page 100, et 16 page 101), ce qui s'explique trés bien par la plus forte pluviométrie en 1985 (figures 5 A, 6 A, 7 A en annexe). Cette année-ci, on peut noter que :

- pour le placement en surface (broadcast), la diminution de l'immobilisation dans l'horizon 10 - 30 cm, suivie d'une augmentation dans l'horizon 30 - 90 cm, traduit une lixiviation plus importante de l'azote engrais que pour les autres techniques de placement ;
- pour le placement en localisé (bande et poquet), la lixiviation est faible : l'immobilisation diminue au delà des 45 cm alors qu'elle augmente dans le cas de l'apport en surface, ce que nous venons d'évoquer ;

- la moindre immobilisation dans le cas de l'apport en bande comparativement à l'apport en poquet, n'est pas liée à une plus grande absorption par la plante (le CRU est même inférieur). Elle est due vraisemblablement à des pertes plus importantes dans l'atmosphère, ce que traduit la quantité d'azote engrais non retrouvé dans le système sol-plante (tableau 7 page 96).

On remarquera la profondeur de lixiviation jusqu'à 150 cm (avec des différences entre les méthodes d'apport que nous venons de montrer) et l'influence trés nette des systèmes racinaires à partir de l'horizon 15 - 30 cm sur la réduction de l'immobilisation. La récupération totale de l'azote engrais pour l'apport en poquet (bilan azote 15 = 100) conduit à penser que les pertes au delà des 150 cm sont négligeables.

IV.3.4.4 - Efficience réelle de l'engrais

Selon l'inéquation 14 (page 54), l'efficience réelle peut être estimée dans l'intervalle de grandeur suivant :

53 % < Efficience urée en "surface" < 68 %

79 % < Efficience urée en "bande" < 91 %

82 % < Efficience urée en "poquet" < 99 %

L'efficience réelle est nettement accrue par la localisation de l'engrais.

Estimée par l'azote 15 "perdu" hors du système sol-plante (page 54), les pertes d'azote dans l'atmosphère sont élevées lorsque l'urée est apportée en surface (de 20 à 40 %), réduites lorsque l'urée est localisée en bande (de 0 à 15 %), faibles ou nulles lorsque l'urée est localisée en poquet (moins de 5 %).

IV.3.4.5 - Valeur A et efficience relative de l'engrais

Cet essai nous donne la possibilité de calculer l'efficience des différentes techniques de placement sur le critère de la valeur A et l'économie d'engrais réalisée en optimisant la technique de placement. Ces calculs requièrent l'application du principe de l'indépendance de la valeur A en fonction de la dose d'engrais, principe démontré expérimentalement et vérifié dans ses conséquences (A.I.E.A 1983). Découlant de ce principe de l'indépendance valeur A et dose d'azote, la proportion suivante peut être écrite :

$$\frac{\%\ NdfF}{X} = \frac{\%\ NdfF.}{\text{Valeur A méthode "bande" ou "poquet"}} \qquad (23)$$

Le % NdfF est obtenu à la dose X appliquée en "bande" ou "poquet".

En faisant l'hypothèse d'une non modification du pool d'azote du sol, ni par la dose (voir ci-dessus) ni par la technique de placement, la valeur A peut être considérée comme l'inverse de l'efficience de l'engrais (A.I.E.A. 1983). Dans nos essais, la technique de placement en "surface" donne une valeur A moyenne sur trois ans, de 98 kg N ha^{-1} équivalent urée "surface" ; la technique de placement en "bande" et en "poquet" donne 57 kg N ha^{-1} équivalent urée "localisée". Par rapport à cette dernière prise comme référence, l'efficience relative de la technique en "surface" est alors la suivante :

$$\text{Efficience relative} = 1 : \frac{98.0}{57.0} = 1 : 1.72 = 0.58 \qquad (24)$$

Quand on apporte 1 kg N ha^{-1} d'urée "localisée", on doit apporter 1,72 kg N ha^{-1} d'urée en "surface" pour **le même effet, apprécié sur le critère du % NdfF.** Réciproquement, quand on apporte 1 kg N ha^{-1} d'urée placée en "surface", en localisant cette urée en profondeur, on peut réduire la dose de 1 à 0,58 kg N ha^{-1} et obtenir le même effet. Pour illustrer ce qui précède, nous prendrons l'exemple relatif au maïs :

- culture de maïs à Séfa où la valeur "A" est égale à 98 kg N ha^{-1} équivalent urée "surface" ;
- dose engrais : 100 N appliquée en surface (la dose appliquée dans nos essais). Quelle dose d'engrais peut-on appliquer en "localisé" en recherchant le même % NdfF?

Compte tenu d'une efficience relative de 0,58 (équation 24), cette dose est :

100 x 0,58 N = 58 N # 60 N.

On peut faire la vérification suivante :

. sur les trois années, le % NdfF mesuré pour la dose 100 N en "surface" est de 51%;
. si l'on considère le mode de placement en "bande", X étant la dose recherchée et 57 kg N ha^{-1} la valeur A (voir ci-dessus), l'équation 23 ci-dessus donne :

$$\frac{51,0}{x} = \frac{100 - 51,0}{57} \Longrightarrow \quad x = 59,3 \# 60\ N$$

Par rapport à la dose 100 N en "surface", la dose 60 N en "bande" donnerait un % NdfF identique mais un rendement légèrement inférieur de 180 kg grain ha^{-1} en moyenne (calculé d'après les fonctions de production) ; la technique en "poquet" donnerait également le même % NdfF mais un rendement sensiblement égal.

Un agriculteur qui localise son urée en poquet, peut réduire sa fertilisation de 100 N à 60 N économisant ainsi 40 kg d'azote urée, tout en maintenant la même efficience relative et le même rendement en grain que s'il apportait son urée à la dose de 100 N en surface; de plus, il simplifie sa technique de fertilisation.

IV.3.4.6 - Conclusion

Nous rappelons que la technique en "surface" comprenant deux apports est celle actuellement vulgarisée. Les techniques d'apport de l'urée en "localisé" ne nécessitant qu'un seul apport sont de ce fait moins contraignantes et comme nous venons de le voir, elles sont plus efficientes, en particulier la technique d'apport de l'urée en poquet enfoui (super-granule dans notre expérience). Ces résultats sont à rapprocher de ceux de GAUDIN *et al* (1987) sur riz à Madagascar qui arrivent aux mêmes conclusions concernant l'efficience de l'urée super granule enfouie par rapport à l'urée en surface.

Tableau 19 : Effet de la méthode d'application de l'urée en surface (S) en bande (B) et en poquet (P) sur les paramètres de la courbe de réponse.

N° de l'essai et année	Rendement du témoin calculé (c) kg grain M.S ha^{-1}			Productivité du premier kg d'azote (b)			Paramètre de courbure (a)		
	S	B	P	S	B	P	S	B	P
Essai V 1983	758	758	-	27	32	-	0.109	0.130	-
Essai VI 1983	160	160	160	22	29	34	0.0635	0.0972	0.108
Essai VII 1985	192	192	192	10	17	20	-	0.0433	0.0620

a, b et c : paramètres de la fonction de production $y = ax^2 + bx + c$

ou $y = bx + c$

IV.4 Conclusion du chapitre IV

Nous avons pu mettre en évidence que malgré un fort effet direct, l'engrais azoté sur la céréale est mal utilisé, les coefficients réels d'utilisation de l'azote (CRU %) étant de 25 % (mil) et 35 % (maïs) en moyenne. Cet azote a surtout pour effet de mobiliser l'azote du sol (NdfS %) qui constitue 50 % et 70 % de l'azote total respectivement du maïs et du mil ayant reçu une dose d'engrais optimale ou sub-optimale. Par ailleurs, une fraction notable de l'azote engrais, de l'ordre de 30 % à 50 %, est immobilisée dans le sol (NiS %) et pourra donc avoir un effet rémanent. Dans différentes situations, nous avons estimé dans un intervalle cette fraction de l'azote engrais (NiSP %) susceptible de participer au cycle interne de l'azote et de ce fait pouvant contribuer au maintien de la fertilité azotée du sol. Les pertes sont également importantes et peuvent aller jusqu'à 40 % de l'engrais apporté ; elles sont dues essentiellement à la volatilisation.

Des différences existent entre les céréales ; en effet, la part de l'azote total provenant de l'engrais (NdfF %) chez le maïs est supérieure à celle du mil. De plus, le maïs de par son bon indice de rendement, valorise mieux l'azote absorbé, comme BLONDEL (1971) l'avait déjà noté.

Ainsi, nous pouvons tirer de ces résultats plusieurs enseignements nous permettant de rechercher les voies de l'optimisation de l'utilisation de l'azote par les céréales :

- la réduction des pertes est une voie importante d'économie de l'azote, que nous avons explorée. D'une part nous avons étudié, en milieu contrôlé, le processus de volatilisation ce qui nous a permis d'attribuer l'essentiel des pertes dans l'atmosphère aux techniques d'apport de l'engrais en surface. D'autre part, nous avons étudié *in situ* les techniques de localisation de l'engrais, permettant de réduire très sensiblement les pertes dans l'atmosphère;
- l'effet direct de l'engrais azoté n'est qu'apparent. En réalité, l'alimentation azotée de la céréale, comme l'effet de l'apport de l'azote, sont régis par le pool d'azote du sol utilisable par les plantes, désigné par pool d'azote mobilisable et représenté par la valeur A. Son rôle semble d'autant plus important que l'indice de rendement de la céréale est bas. Il constitue, à cet égard, un volant de sécurité. Contrairement à l'enfouissement de paille qui n'accroît pas la valeur A, la paille compostée l'accroît et contribue de ce fait à renouveler et augmenter l'azote mobilisable.

Ces faits nous permettent d'affirmer que la fourniture d'azote à la céréale est tributaire de l'entretien organique du sol. Dans un contexte de faible disponibilité en résidus organiques et fumure azotée, il faut tenter d'assurer cet entretien en compostant les pailles directement ou par l'intermédiaire des animaux (fumier) et en maximisant la source d'azote exogène constituée par la légumineuse en rotation avec la céréale.

CHAPITRE V : CONTRIBUTION DES LEGUMINEUSES AU POOL D'AZOTE DU SOL

V.1 - Dispositifs expérimentaux

V.1.1 - Essai au champ VIII
V.1.2 - Essai au champ IX
V.1.3 - Essai en lysimètre X
V.1.4 - Essai au champ XI
V.1.5 - Essai au champ XII
V.1.6 - Essai au champ XIII
V.1.7 - Essai au champ XIV

V.2 - Choix variétal - Essai au champ VIII

V.3 - Contraintes du milieu

V.3.1 - Contrainte chimique
V.3.1.1 - Problème de l'azote minéral du sol
V.3.1.1.1 - Faut-il augmenter l'azote minéral en apportant des engrais azotés ?
Essai au champ IX
V.3.1.1.2 - Faut-il réduire l'azote minéral en pratiquant la culture associée légumineuse-céréale ?
Essai en lysimètre XI.
V.3.1.2 - Amélioration de la fertilité par l'amendement calcique et organique.
Essai au champ X.
V.3.1.3 - Amélioration de la fertilité par le phosphatage.
Essais au champ XII et XIV.

V.3.2 - Contrainte biologique
V.3.2.1 - Les sols n'ont pas de rhizobiums spécifiques.
Essai au champ XIV.
V.3.2.2 - Les sols sont défavorables à la nodulation et à la fixation de N_2.
Essai au champ XI.

V.3.2.3 - Les sols sont bien pourvus en rhizobiums mais on veut accroître leur efficience.

Essai au champ XIII.

V.3.2.4 - Les sols sont dépourvus ou mal pourvus en champignons mycorhiziens.

Essai au champ XIV.

V.3.3 - Contrainte climatique.

V.3.3.1 - Relation entre la pluviométrie et la fixation de N_2.

Essais IX et XIII. Essais XII et XIV.

V.3.3.2 - Déficit hydrique et fixation de N_2 en cours de cycle.

Essai XII.

V.3.3.3 - Conclusion

V.4 - Conclusion du chapitre V

La fixation symbiotique de N_2 par les légumineuses a été établie scientifiquement au début du siècle dernier par BOUSSINGAULT. Cet azote fixé n'est pas seulement utilisé dans le sol par le biais des matières végétales restituées au sol, il enrichit également directement la terre par l'action de la biomasse racinaire à savoir les nodules, les racines et les exsudats racinaires.

En fait, il est assez inexact de parler de plantes fixatrices de N2. Les seuls organismes capables de transformer N_2 en azote combiné, sont des micro-organismes, bradyrhizobiums dans le cas de l'arachide et du soja vivant en **symbiose** avec la plante.

Le rôle améliorant des légumineuses est donc essentiellement dû à leur capacité fixatrice de N_2 et aux possibilités de transfert de cet azote fixé aux non légumineuses associées ou en rotation.

Les processus de transfert d'azote sont moins compliqués quand la non légumineuse suit la légumineuse dans la rotation. La figure 24, dérivée de la figure 5, exprime les vecteurs (désignés par un V dans le texte et numérotés de 1 à 21) des flux d'azote dans le système sol-légumineuse, partant du sommet avec le semis de la légumineuse jusqu'au développement de la culture suivante, en bas de figure. C'est le cas des systèmes arachide-mil et soja-maïs que nous étudions.

Les sources d'azote de la légumineuse sont les semences (Nsem en V1), l'engrais azoté en V2 et le sol en V3 qui fournissent Ns, et la fixation de N_2 dans les nodules (NFix en V4). Le N total de la légumineuse (compartiment Cl) peut être exporté hors du système lorsque les gousses et la paille sont récoltées (Nex en V5). Les pailles consommées par les animaux (V6) peuvent être considérées comme exportées (Nex en V11) si le fumier n'est pas restitué en V12 et V13.

Secondairement, les grains peuvent tomber au sol (V7) ; c'est le cas du soja dont la déhiscence, lorsqu'elle intervient trop précocement, entraîne une chute des graines ; c'est le cas de l'arachide, dont la gousse enterrée est parfois difficile à extraire ; ces graines meurent (V10) ou sont mangées par les animaux (V9).

La partie de la légumineuse qui n'est pas récoltée ni consommée par les animaux, comprenant les défoliations, importantes chez l'arachide, les résidus de battage (c'est le cas du soja dont le battage s'effectue au champ), les pailles (cas du soja) et toujours la biomasse racinaire, est considérée comme résidu de récolte (Nr en V8). Une partie de ces résidus de récolte, suite aux brûlis (V16) et à la minéralisation (V15) est perdue (Nv). Une fraction peut disparaître aussi sous l'action des termites et de l'érosion (V18). La partie restante enrichit le pool d'azote du sol (V14). Ce pool d'azote est divisé en deux sous-pools V (azote organique

stable et minéralisable) et VI (azote minéral) ; le sous-pool VI résulte d'une minéralisation rapide, à partir des résidus végétaux à C/N généralement bas tel que les pailles de légumineuse (GANRY 1977) et d'une minéralisation plus lente (V17) à partir de l'azote organique du sol. Ce pool d'azote est soumis à son tour aux pertes d'azote (V18, V19 et V20). Finalement, la culture suivante (C VII), céréale en l'occurrence, pourra utiliser la quantité Nψ (V21) dont la valeur est la suivante :

$$N\psi = Nsem + Ns + NFix - Nex - Nv - NI$$

Etant donné que Ns est emprunté au sol, pour qu'il y ait enrichissement du sol en azote il faut que :

$$N\psi > Ns$$

ce qui implique :

$$Nsem + NFix > Nex + Nv + NI$$

Dans la pratique, la rotation peut comporter deux légumineuses successives ; à ce moment là, V21 contribue à V3, réalisant ainsi un cycle de l'azote. Abstraction faite des éventuels problèmes engendrés par la monoculture, plusieurs cycle de légumineuses peuvent ainsi accroître la fertilité du sol.

Dans ce chapitre, nous ne traitons pas tous les aspects précédemment évoqués. Cependant, nous privilégions l'étude du compartiment I et dans tous les cas établissons la distinction dans le N total entre l'azote provenant du sol (incluant l'azote provenant des semences), l'azote provenant de la fixation de N_2 et l'azote provenant de l'engrais marqué bien entendu puisque c'est précisément l'engrais marqué qui permet cette distinction. Pour les parties aériennes, on obtient ainsi respectivement NdfS, NdfFix et NdfF avec précision. Nex est aussi connu avec précision mais Nr, Nv et NI sont estimés. Nous recherchons aussi l'économie maximale de l'azote (accroissement de NdfFix et réduction de NdfS) ; enfin, nous tentons une estimation de la contribution de la légumineuse à l'enrichissement du pool d'azote du sol (essai XI).

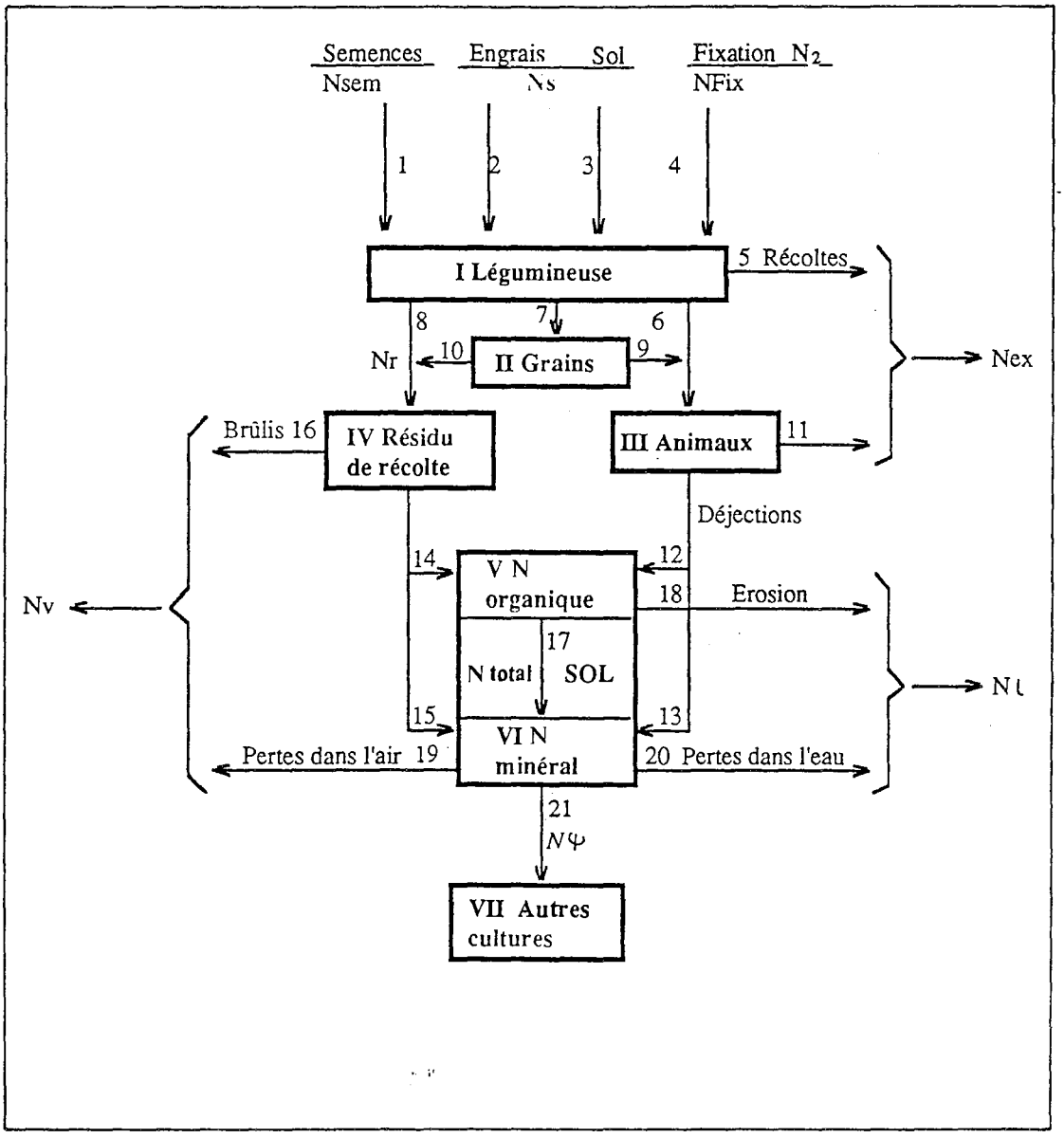


Figure 24 : Schéma montrant le transfert d'azote de la culture de légumineuse à la culture suivante (d'après HENZELL et VALLIS 1977).

V.1 - LES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Six essais aux champ et un essai en lysimètres sont réalisés. La situation géographique, environnementale et culturale de ces différents essais est représentée au tableau 20 .

L'inoculation de l'arachide et du soja par bradyrhizobium est réalisée par WEY selon les méthodes développées par ce dernier pour l'arachide (WEY 1974) et le soja (WEY et SAINT-MACARY 1982, WEY 1983). Au moment de la présentation des résultats nous donnerons, s'il y a lieu, plus de détails sur l'inoculation lorsque celle-ci apparaîtra comme technique déterminante.

V.1.1 - Essai au champ VIII

Le but de l'essai au champ VIII est triple :

(a) étudier l'effet de l'azote starter sur le rendement et la fixation de N_2 du soja ;

(b) comparer la capacité de plusieurs variétés de soja à fixer symbiotiquement (et à restituer cet azote au sol), en présence d'une faible ou d'une forte fumure azotée ;

(c) dans le cadre de la méthodologie appliquée (paragraphe III.2.3 page 67) tester deux cultures de soja de référence à savoir : un soja nodulant non inoculé et un soja non nodulant.

L'essai est implanté à Séfa dans le Sud du Sénégal (tableau 20) dont l'isohyète actuel est 950 mm (figure 2 page 30).

Le dispositif expérimental se décompose en deux essais : un essai "azote 15" (figure 17 Aa et figure 17 Ab en annexe) et un essai "rendement" (figure 17 Ac et figure 17 Ad en annexe).

L'essai "azote 15" consiste en une combinaison factorielle de sept variétés (cinq variétés de soja et deux variétés en culture de référence) à deux niveaux d'azote (20 N et 100 N). Il a pour but de déterminer la part de l'azote du soja dérivé de la fixation de N_2 (% NdfFix). La proximité des traitements "non nod." de référence n° 6 et 7 et des autres traitements "nod." permet le calcul d'une valeur A fixation par bloc, par application de l'équation 18 page 66.

L'essai "rendement" consiste en une combinaison factorielle de cinq variétés de soja à trois niveaux d'azote (0,20 N et 100 N).

Tableau 20 : Situation géographique, environnementale et culturale des différents essais réalisés sur légumineuses.

	Dénomination	Localité	Type de sols (2)	Variété (1) cultivée	Précédent cultural	Année de réalisation	Pluviométrie
VIII	Essai au champ "criblage variétal du soja"	Séfa	Ferrugineux tropical lessivé à concrétions sur grés sablo-argileux dit sol "beige"	Cinq variétés de soja : 44/A/73 26/72 22/72 4/73 Jupiter	Maïs . Rotation maïs arachide	1981	1060 mm
IX	Essai au champ "fumure azotée starter de l'arachide"	Bambey	Ferrugineux tropical peu lessivé type "dek-dior"	Arachide 55/437	Niébé en culture dérobée. Rotation (Mil x niébé) - arachide	1974	458 mm
X	Essai en lysimètres "cultures associées"	Bambey	Ferrugineux tropical peu lessivé type "dior"	Mil : var. syn. 1 Arachide : var. 55/437 soja : var. 44/A/73	Mil	1978	495 mm + irrigation complémentair
XI	Essai au champ régénération des sols dégradés	Thilmakha	Ferrugineux tropical peu lessivé type "dior"	Arachide var. 55/437	Mil . Rotation mil-arachide	1983	206 mm
XII	Essai au champ "alimentation phospho-azotée du soja"	Séfa	Ferrugineux tropical lessivé à concrétions sur grés sablo-argileux dit sol "beige"	Soja	Jachère 2 ans	1980	722 mm
XIII	Essai au champ "inoculation de l'arachide"	Bambey	sol "dior"	Arachide 55/437	Mil . Rotation mil-arachide	1975	521 mm
XIV	Essai au champ "double inoculation Bradyrhizobium et Gomus mosseae en présence de phosphates"	Séfa	sol "beige"	Soja 26/72	Jachère durant 5 ans	1982	820 mm

(1) L'arachide var. 55/437 a été sélectionnée au Centre de Recherches Agronomiques (C.R.A) de Bambey en 1955. A croissance rapide le premier mois, d'un cycle végétatif de 90 jours, cette variété est très productive à condition de respecter la densité. Elle est adaptée aux saisons des pluies courtes, et résistante à la sécheresse.

(2) Pour une plus ample information voir le tableau 1.

Ces essais sont de type Blocs "split-plot" avec six répétitions.

Les traitements sont les suivants :

- **sous-traitements "dose d'azote"** :

No - Sans fumure azotée
N1 - Fumure azotée de 20 Kg N ha^{-1}
N2 - Fumure azotée de 100 Kg N ha^{-1}

- **traitements principaux "variétés"** :

1 - 44/A/73
2 - 4/73
3 - 22/72
4 - 26/72
5 - Jupiter
6 - Chippewa non nodulant
7 - 44/A/73 non inoculée.

L'azote est apporté sous forme de sulfate d'ammonium : en solution dans l'essai "azote15" et sous forme solide dans l'essai rendement. L'excès isotopique est respectivement pour N1 et N2 de 4,61 % et 1,01 %.

La fertilisation minérale P et K a été apportée en quantité suffisante pour satisfaire les besoins du soja, à savoir 45 kg ha^{-1} P_2O_6 et 90 kg ha^{-1} K_2O en deux fois (60kg ha^{-1} K_2O au semis et 30 kg ha^{-1} K_2O au début de la floraison).

L'inoculation du sol a été réalisée mécaniquement, au moment du semis et dans le sillon de semis, à raison de 25 Kg ha^{-1} de tourbe contenant 10^9 bradyrhizobiums par gramme d'inoculum frais (WEY 1983).

Les variétés de soja utilisées ont un cycle semis récolte de l'ordre de 100 à 105 jours (LARCHER *et al* 1984) hormis la variété non nodulante "Chippewa" dont le cycle (dans les conditions climatiques du Sénégal) est d'environ 80 jours. La condition de similitude des longueurs de cycle ne peut donc être respectée comme cela est stipulé au paragraphe III.2.2.1 page 64, entraînant une évaluation par excès du % NdfFix mais sans conséquence pour les comparaisons variétales sur le critère de la fixation de N_2.

Le cycle cultural de la variété 44/A/73 avec ses principaux stades végétatifs est situé par rapport aux pluies à la figure 12 A en annexe.

V.1.2 - Essai au champ IX

Le but de l'essai au champ IX réalisé à Bambey est double :

(a) vérifier la validité de la méthode d'évaluation de la quantité de N_2 fixée (équation 18 page 66) en comparant une plante de référence non légumineuse (mil) et une légumineuse (arachide) dont la nodulation serait inhibée par une trés forte dose d'azote ;

(b) évaluer l'effet de différentes doses d'azote engrais (urée) sur la fixation de N_2 par l'arachide, le coefficient réel d'utilisation de l'azote urée (CRU) et les rendements.

L'essai est implanté à Bambey en zone soudanienne nord (tableau 20) dont l'isohyète actuel est 450 mm (figure 2 page 30).

Le dispositif expérimental est de type Blocs avec six répétitions pour la mesure des rendements de l'arachide et cinq répétitions pour les mesures d'azote sur la plante (mesures faites sur parcelles azote 15).

Le schéma parcellaire est représenté à la figure 18 A en annexe.

Les différents traitements sont les suivants :

1 - Arachide sans azote engrais
2 - Mil hâtif de 90 jours, 120 kg N ha^{-1} au semis (^{15}N)
3 - Arachide recevant 120 kg N ha^{-1} au semis (^{15}N)
4 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} au semis (^{15}N)
5 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} à 3 semaines
6 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} à 6 semaines
7 - Arachide recevant 30 kg N ha^{-1} au semis (^{15}N)
8 - Arachide recevant 30 kg N ha^{-1} à 3 semaines
9 - Arachide recevant 30 kg N ha^{-1} à 6 semaines
10 - Arachide recevant 60 kg N ha^{-1} au semis (^{15}N)
11 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} au semis : inoculation avec souche de bradyrhizobium CB/756
12 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} au semis : inoculation avec souche de bradyrhizobium isolée au Sénégal par WEY.

Les traitements 1 à 10 sont réalisés sans inoculation.

L'azote est apporté sous forme d'urée marquée avec ^{15}N pour les traitements 2, 3, 4, 7 et 10. Le phosphore et le potassium sont apportés au semis respectivement sous forme de supertriple à raison de 100 kg ha^{-1} (45 kg ha^{-1} P_2O_5) et sous forme de chlorure à raison de 100 kg ha^{-1} (60 kg ha^{-1} K_2O).

De ce protocole, on peut espérer tirer quatre interprétations :

(a) relative aux valeurs A : en effet, le traitement 3 ayant pour but d'empêcher toute nodulation sur arachide par l'apport d'une forte quantité d'azote, il pourra être ainsi possible de faire le rapprochement des valeurs A de la plante de référence "non nod." (traitement 2) et de la plante fixatrice dont on cherche à annihiler la fixation (traitement 3) ;

(b) relative à la courbe de réponse de l'arachide à l'azote engrais apporté au semis (traitements 1, 4, 7, 10 et 3) qu'on étudiera en liaison avec la fixation de N_2 ;

(c) relative à l'essai factoriel "deux doses d'azote x trois dates d'application" (traitements 4, 5, 6, 7, 8 et 9) ;

(d) relative à l'effet de l'inoculation et à la comparaison des souches bactériennes (traitements 2, 4, 11 et 12).

Les interprétations (c) et (d) ne portent que sur le rendement (tableau 20 A en annexe), raison pour laquelle elles ne sont pas abordées ici. Cependant, l'ensemble des résultats est présenté pour permettre l'examen du coefficient de variation indicateur de la précision de l'essai.

La valeur A sol moyenne est calculée à partir du traitement 2 et soustraite aux différentes valeurs A (sol + fixation) (paragraphe III.2.2.1. page 64).

Le cycle cultural de l'arachide est situé par rapport aux pluies à la figure 10 A en annexe.

V.1.3 - Essai en lysimètre X

Le but de l'essai X est d'étudier comparativement la culture associée et la culture pure sur le critère de l'utilisation de l'azote minéral et de la fixation symbiotique de N_2 par une légumineuse associée ou non à une céréale ; on mesure, pour la même plante, la variation de

l'excès isotopique entre la culture associée et la culture pure. Une baisse de l'excès isotopique de la légumineuse est attribuée à un accroissement de la fixation de N_2 (équation 19 page 67). Une baisse de l'excès isotopique de la céréale serait attribuée à un transfert d'azote de la légumineuse vers la céréale par minéralisation des nodules et exsudation de la légumineuse.

L'essai X est conduit en lysimètres contenant 70 kg d'un sol "dior", à Bambey, *in situ,* avec irrigation complémentaire à la demande.

Les traitements sont les suivants :

1 - Soja 1 non inoculé désigné par soja 1
2 - Soja 2 inoculé désigné par soja 2
3 - Mil
4 - Soja 1 x mil 1 : le mil associé au soja1 est désigné par mil 1
5 - Soja 2 x Mil 2 : le mil associé au soja 2 est désigné par mil 2
6 - Arachide 3
7 - Mil
8 - Arachide 3 x mil 3 : le mil associé à l'arachide 3 est désigné par mil 3

Chaque traitement est répété cinq fois et l'ensemble est randomisé.

Les plantes sont disposées, en culture pure à raison de quatre pieds par lysimètre, en culture associée à raison, soit de quatre pieds de soja et d'un pied de mil, soit de deux pieds d'arachide et d'un pied de mil. L'inoculation du soja est faite à raison de 10 ml par pied d'une culture de la souche de *Bradyrhizobium japonicum* USDA 138 contenant 10^8 rhizobiums ml^{-1}. Aucune fumure azotée n'est apportée. Une fumure minérale P, K, S et oligo-éléments a été apportée en quantité suffisante pour satisfaire les besoins des plantes dans ces conditions de culture dans un volume de sol limité. Le sol est marqué à 0,070 % et 0,100 % d'excès isotopique respectivement pour le sol cultivé en soja et le sol cultivé en arachide.

V.1.4 - Essai au champ XI

Le but de l'essai au champ XI mis en place à Thilmakha (voir la carte du Sénégal figure 1 page 29) est triple : (a) régénérer le sol par l'amendement, (b) pouvoir assurer ensuite une production satisfaisante (objectif de production : 1 t ha^{-1} de grains de mil et de gousses d'arachide) avec le minimum d'intrants, (c) intervenir sur (a) et (b) afin d'assurer une production minimale sous faible pluviométrie fréquente dans cette zone devenue sub-sahélienne suite à une baisse sensible de la pluviosité (figure 2 page 30).

L'essai au champ pluriannuel, déjà décrit par ailleurs (WEY et OBATON 1978, WEY *et al.* 1987, CISSE et VACHAUD 1987 et 1988), a été mis en place par nous-mêmes en 1972 en vue d'étudier l'influence de certaines techniques culturales (fumure minérale, amendements calcique et organique) sur l'activité fixatrice de N_2 et le rendement de l'arachide, en raison des symptômes inquiétants de chlorose azotée (désignée ainsi par analogie avec la chlorose ferrique), voire de "nanisme jaune", en extension, que présente l'arachide dans cette région.

Le dispositif expérimental est de type Blocs avec six répétitions.
Le shéma parcellaire est représenté aux figures 19 Aa et 19 Ab en annexe.

Les différents traitements sont les suivants :

1 - Arachide recevant la fumure minérale (f.m.)
2 - Arachide recevant la chaux + f.m
3 - Arachide recevant le fumier + f.m

Les mêmes traitements sont appliqués aux plantes de référence mil et arachide "non nod."

Les traitements chaulage et enfouissement de fumier sont appliqués tous les deux ans sur la culture arachide, en plus de la fumure minérale vulgarisée appliquée annuellement à raison de 150 kg ha^{-1} d'engrais ternaire N P K de formule 8 - 18 - 27 pour l'arachide et 150 kg ha^{-1} d'engrais ternaire N P K de formule 14 - 7 - 7 pour le mil. Le chaulage est réalisé à raison de 600 kg ha^{-1} $2ans^{-1}$ de $Ca(OH)_2$ et l'apport de fumier est de 10 t ha^{-1} $2ans^{-1}$ à une humidité comprise entre 50 et 60 % du poids frais. L'apport d'azote 15 est réalisé aprés huit années de fonctionnement du système cultural, sous forme de $(^{15}NH_4)_2SO_4$ marqué à 4,94 % à une dose de 14 kg N ha^{-1} sur arachide et 0,78 % à une dose de 77 kg N ha^{-1} sur les plantes de référence (mil et arachide "non nod.").

L'arachide non nodulante est fournie par l'I.C.R.I.S.A.T.*

Le cycle cultural est situé par rapport aux pluies à la figure 8 A en annexe.

V.1.5 - Essai au champ XII

Le but de l'essai au champ XII réalisé à Séfa est d'étudier *in situ* d'une part l'alimentation azotée et phosphatée du soja et d'autre part de quantifier la fixation de N_2.

---

* Institut de Recherche International sur les Céréales en zone semi aride.

Le dispositif expérimental est de type Blocs avec six répétitions.

Chaque parcelle élémentaire (28 m^2) est constituée d'une parcelle de "rendement" (6,25 m^2) et d'une parcelle "^{15}N" (11,25 m^2), elle-même divisée en trois sous-parcelles (1,5m_2 chacune) destinées aux trois récoltes effectuées en cours de cycle : la première au stade floraison, la deuxième au stade remplissage des gousses et la troisième au stade maturité (figure 20 A en annexe). A cet égard, nous considérons que les stades reproductifs R1 et R2 sont basés sur la floraison, R3 et R4 sur le développement des gousses, R5 et R6 sur le développement des graines, et R7 et R8 sur la maturation (FEHR *et al.* 1971).

Les différents traitements sont les suivants :

1 - Inoculation avec *Bradyrhizobium japonicum* (souche USDA 138) avec azote starter à la dose de 17 kg N ha^{-1}, sans apport de phosphore ;

2 - La même inoculation avec azote starter, avec apport de phosphore sous forme de supertriple à la dose de 22 kg P ha^{-1} ;

3 - Fertilisation azotée à la dose de 120 kg N ha^{-1} sans apport de phosphore ;

4 - La même dose d'azote avec apport de phosphore à la dose de 22 kg de P ha^{-1}.

Le phosphate est apporté en surface puis incorporé superficiellement par un hersage.

Toutes les parcelles élémentaires reçoivent l'engrais potassique sous forme de KCl aux doses de 60 Kg ha^{-1} K_20 et 30 Kg ha^{-1} K_20 appliqués respectivement au semis et au début de la floraison. L'engrais azoté est appliqué sous forme de solution de $(^{15}NH_4)_2SO_4$ marqué à 4,85% d'excés isotopique pour la dose de 17 kg N ha^{-1} et 0,760 % pour la dose de 120 kg N ha^{-1}.

La variété de soja cultivée est la variété 44/A/73. L'inoculum de bradyrhizobium (souche U.S.D.A. 138) dont le support est la tourbe et qui contient 3.10^8 rhizobiums par g, est appliqué au semis dans le lit de semence à la dose de 220 g par parelle de 28 m^2.

Le cycle cultural du soja est situé par rapport aux pluies à la figure 11 A en annexe. La distribution pluviométrique fait apparaitre une période de sécheresse du 10 septembre au 1 octobre, coïncidant avec la période de remplissage des gousses.

V.1.6 - Essai au champ XIII

Le but de l'essai au champ XIII est d'étudier :

(a) l'effet comparé de l'inoculation des graines et du sol et de l'inoculation retardée du sol, avec deux souches différentes ;

(b) l'effet du fractionnement de l'engrais azoté ;

(c) l'effet d'un engrais à libération lente d'azote : la N-lignine provenant de République Fédérale d'Allemagne (FLAIG 1970).

L'essai est implanté à Bambey.

Le dispositif expérimental est de type Blocs à six répétitions pour les mesures de rendements de l'arachide et à cinq répétitions pour mesures d'azote dans la plante (mesures faites sur parcelles azote 15). Le schéma parcellaire est représenté à la figure 18 A en annexe.

Les différents traitements sont les suivants :

1 - Arachide sans azote engrais
2 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} au semis
3 - Arachide recevant 30 kg N ha^{-1} au semis
4 - Arachide recevant 30 kg N ha^{-1} (2 x 15 N) : 15 N au semis + 15 N à 3 semaines
5 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} + inoculation graine avec CB 756
6 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} + inoculation sol avec SU 430
7 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} + innoculation sol avec CB 756 au semis
8 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} + inoculation sol avec SU 430 au semis
9 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} + inoculation sol avec CB 756 à 2 semaines
10 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} + inoculation du sol SU 430 à 2 semaines
11 - Mil hâtif 90 jours recevant 80 kg N ha^{-1} au semis
12 - Arachide recevant 15 kg N ha^{-1} sous forme de N-lignine

Les traitements 5 à 10 sont inoculés. Les souches CB 756 et 430 utilisées sont d'origine australienne.

L'azote est apporté sous forme d'urée (traitements 2 à 11) et sous forme de N-lignine sur le traitement 12. L'excés isotopique de l'azote est de 4,04 % pour la dose de 15 kg N ha^{-1} apportée sur arachide et 1,04 % pour la dose de 80 kg N ha^{-1} apportée sur le mil.

Le phosphore et le potassium sont apportés au semis respectivement sous forme de supertriple à raison de 100 kg ha^{-1} (45 P_2O_5) et sous forme de chlorure à raison de 100 kg ha^{-1} (60 K_2O).

De ce protocole on peut espérer tirer les deux interprétations suivantes :

(a) relative à l'effet de la technique, de l'époque et de la souche d'inoculation (traitements 5, 6, 7, 8, 9 et 10) ;

(b) relative à l'effet de la dose, du fractionnement et de la forme d'engrais azoté (traitements 2, 3, 4 et 12) ;

L'interprétation (b) qui ne porte que sur le rendement (tableau 32 A en annexe) ne figure pas ici. L'ensemble des résultats est cependant présenté pour permettre l'examen du coefficient de variation, indicateur de la précision de l'essai.

La plante de référence, le mil permet de déterminer la valeur A.

Le cycle cultural de l'arachide est situé par rapport aux pluies à la figure 10 A en annexe.

V.1.7 - Essai au champ XIV

Le but de l'essai XIV réalisé à Séfa est de confirmer des résultats obtenus antérieurement (GANRY *et al.* 1982), à savoir : (a) l'effet de la fumure azotée, (b) l'effet de l'inoculation par *Bradyrhizobium* ou par *Bradyrhizobium* + *Glomus mosseae* (champignon endomycorhizien), en présence ou absence de phosphate.

L'essai XIV en objet est réalisé dans un sol à faible potentiel d'infection endomycorhizienne, le phosphore étant cette fois-ci apporté sous deux formes : supertriple et tricalcique.

Le dispositif expérimental est de type Blocs "split-plot" avec huit répétitions. Le schéma parcellaire est représenté aux figures 21 a, 21 b, 21 c, et 21 d.

Les différents traitements sont les suivants :

. traitements principaux :

1 - Absence d'inoculation ; azote engrais = 90 N (90 N) ;

2 - Inoculation avec une souche de bradyrhizobium ineffective (G1) ;
azote engrais = 90 N (I - 90 N) ;

3 - Inoculation avec une souche de bradyrhizobium effective (G3) ;
azote engrais starter = 17 N (R - 17 N);

4 - Double inoculation avec une souche de bradyrhizobium effective (G3)
et *Glomus mosseae* ; azote engrais starter = 17 N (RM - 17 N) ;

1 et 2 constituent les traitements de référence "non nod." ; le traitement 1 se justifie par l'absence de *Bradyrhizobium japonicum* dans le sol ;

. traitements secondaires :

A - Sans phosphate (OP) ;
B - Avec phosphate supertriple = 22 kg P ha^{-1} (Super) ;
C - Avec phosphate naturel = 22 kg P ha^{-1} (P-naturel).

La fumure minérale apportée est identique à celle de l'essai XII. L'azote est apporté sous forme de $(^{15}NH_4)_2SO_4$ marqué à 4,73 % à la dose de 17,2 kg N ha^{-1}, et marqué à 1,01 % à la dose 90,0 kg N ha^{-1} apportée sur soja de référence "non nod".

La variété de soja cultivée est la variété 26/72. Son cycle cultural est situé par rapport aux pluies à la figure 13 A en annexe.

V.2 - CHOIX VARIETAL

Essai au champ VIII

NUTMAN (1965) fait remonter les premiers travaux concernant l'effet variétal sur l'efficacité de la fixation symbiotique de N_2 à 1948. Cet effet est signalé chez plusieurs espèces de légumineuses par DOMMERGUES et MANGENOT (1970) mais ces auteurs reconnaissent que les spécialistes de génétique végétale ne tiennent pas assez compte de l'efficacité symbiotique lors de la sélection des différentes variétés de légumineuses et qu'il y a là un domaine qu'il convient d'explorer d'avantage

L'application de la méthode isotopique au choix variétal des légumineuses *in situ* est relativement récente. Elle permet d'identifier des systèmes fixateurs de N_2 hautement performants ou, à l'inverse, de repérer des systèmes fixateurs médiocres risquant de produire au détriment de la fertilité azotée du sol. Voici quelques exemples concernant le soja tirés de la littérature, qui peuvent montrer l'impact agronomique de cette technique. LIN (1983) en Chine (Taiwan) étudie sept variétés sur le critère fixation de N_2 : il met en évidence trois résultats : (a) un net effet variétal, (b) pas d'effet inhibiteur de l'azote engrais appliqué à 30 kg N ha^{-1}, (c) aucune relation entre le rendement et le % NdfFix. COALE *et al.* (1985) aux U.S.A. étudiant trois variétés, montrent que la différenciation entre variétés n'apparait qu'à la maturité physiologique pour la matière sèche, le N total et le NdfFix mais que le % NdfFix reste inchangé ; en revanche, cet auteur montre que le précédent cultural affecte grandement le % NdfFix qui est de 65 % aprés soja et seulement de 32 % aprés luzerne. En Grèce, DOUKA *et al* (1986) montre (a) que l'effet "souche bradyrhizobium x variété" est prédominant et qu'un tel système fixateur bien sélectionné peut fixer jusqu'à 200 kg N ha^{-1}, (b) que la dose d'azote engrais n'a pas d'effet.

Notre étude (essai au champ VIII en objet) est fondée sur les indices "économie de l'azote" et "maintien de la fertilité azoté" que nous avons définis au paragraphe III.2.3.2 page 68.

De toutes les légumineuses annuelles, le soja a la plus forte productivité protidique et l'indice de rendement le plus élevé. Basé sur le N total, il est d'environ 80 % contre 60 % pour l'arachide, mais aux prix d'une absorption importante d'azote dont au moins 25 % provient du sol et 2 ou 3 % de l'azote engrais starter. Il est donc nécessaire de rechercher les variétés les plus économes de l'azote du sol ou en d'autres termes celles qui par unité d'azote sol absorbée auront le plus grand N total.

L'application de la méthode de la valeur A décrite au paragraphe III.2.4 nécessite le choix de la plante de référence ; à cet égard, rappelons les quatre traitements appliqués dans l'essai VIII : un soja nodulant non inoculé est comparé à un soja non nodulant à deux niveaux d'azote : 20 N et 100 N.

Le soja non nodulant présentant la plus faible valeur A a été retenu (tableau 17 A et 18 A en annexe).

Les résultats du tableau 21 permettent de classer les différentes variétés étudiées :

- sur l'indice "économie de l'azote" calculé d'aprés l'équation 21 page 69, c'est-à-dire l'aptitude de la variété à produire des protides en utilisant le minimum d'azote minéral (essentiellement d'azote sol); les variétés les plus économes se classent de la façon suivante:

4/73 < Jupiter < 44/A/73 < 22/72 < 26/72 avec 20 N engrais
4/73 < Jupiter < 44/A/73 = 22/72 = 26/72 avec 100 N engrais

- sur l'indice "maintien de la fertilité azotée" calculé d'aprés l'équation 22 page 69, les variétés pouvant enrichir le sol en azote sont 26/72 et 22/72, mais en présence d'une forte dose d'azote engrais seule la variété 26/72 apporte au sol, en N_2 fixé, l'équivalent de ce qu'elle exporte en azote sol et azote engrais.

En plus de ses qualités morphologiques et agronomiques connues, la variété I.S.R.A. - I.R.A.T. 26/72 présente donc une bonne aptitude à économiser l'azote du sol (c'est sans doute parce que cette variété est relativement plus tolérante à l'azote minéral que les autres variétés) et peut enrichir le sol en azote à condition de restituer ses pailles.

Ce classement opéré en présence d'une fumure azotée minérale permet de confirmer l'aptitude de la variété 26/72 à fixer N_2 en présence d'azote minéral ; mais, dans la pratique, une telle fumure serait irréaliste.

Cependant cette étude de choix variétal ayant été réalisée en conditions hydriques optimales, celles de l'année 1981, elle gagnerait à être reproduite en conditions de déficit hydrique afin de pouvoir vérifier la validité des classements ci-dessus.

Dans une agriculture où le choix variétal ne serait pas possible, l'agriculteur pour éviter un déficit du bilan azoté devra faire appel à un rhizobiologiste qui cherchera à augmenter le % NdfFix de la variété cultivée jusqu'à la valeur de l'indice de rendement (harvest index) calculé sur la base de N total, à savoir :

$$\%\ \text{NdfFix} \xrightarrow{\text{doit tendre vers}} \frac{\text{N total grain}}{\text{N total plante entière}}$$

afin que la restitution des pailles puisse équilibrer le bilan azoté.

Tableau 21 : Economie de l'azote et maintien de la fertilité azotée de cinq variétés de soja en présence de 20 N (starter) et 100 N.

VARIETES	Economie de l'azote : $\frac{NdfS + NdfF}{N \text{ total plante}} \times 100$		Maintien de la fertilité azotée : N total paille - (Ndfs + NdfF) Kg ha^{-1}	
	20 N	100 N	20 N	100 N
ISRA-IRAT 44/A/73	24,4 (0.79)	24,4	- 5,2	- 4,10
ISRA-IRAT 4/73	26,9 (0.85)	37,4	- 9,5	-17,1
ISRA-IRAT 22/72	19,5 (0.79)	24,6	+ 2,7	- 7,1
ISRA-IRAT 26/72	14,4 (0.83)	24,1	+ 4,0	- 0,8
JUPITER	25,0 (0,83)	27,7	-11,0	-14,5

Ce tableau résulte des tableaux 15A à 19A en annexe comprenant l'interprétation statistique.

Entre parenthèses : indice de rendement

V.3 - CONTRAINTES DU MILIEU

V.3.1 Contrainte chimique

V.3.2 Contrainte biologique

V.3.3 Contrainte climatique

Contrairement à une option largement répandue, la fixation symbiotique de N_2 (% NdfFix) pour une plante donnée, dans une situation donnée, varie considérablement. En zone semi-aride, certains facteurs jouent un rôle majeur : ce sont la présence de souches effectives et spécifiques de rhizobiums, la quantité d'azote sol minéralisable et la réserve en eau utile du sol. Secondairement, citons les facteurs : variétal, teneur en phosphore assimilable et fertilité des sols. Ces facteurs limitants ou contraintes peuvent affecter la quantité de N_2 fixée (NdfFix) de trois façons :

a) la contrainte affecte à la fois le % NdFix et le rendement ;
b) la contrainte affecte le % NdfFix et dans une moindre mesure le rendement ;
c) la contrainte affecte seulement le rendement.

Nous allons montrer à travers quelques exemples concernant le soja et/ou l'arachide comment la méthode isotopique permet de juger des effets d'une variété, d'une technique ou d'une contrainte du milieu sur le critère du NdfFix et du NdfS de la légumineuse.

V.3.1. Contraintes chimiques

V.3.1.1. - Problème de l'azote minéral du sol

Il est bien établi que les nitrates et dans une moindre mesure l'azote ammoniacal, retardent et diminuent la nodulation et la fixation de N_2 (DIXON 1969 et DART 1974). Mais d'un autre côté leur présence est nécessaire pour alimenter la légumineuse durant la période végétative précédant la mise en place du système fixateur qui ne fonctionne pas avant 30 à 40 jours chez l'arachide et le soja (WEY 1974). A notre connaissance, trois approches existent et pourraient conduire à une solution : (I) découvrir des sytèmes fixateurs non inhibés par l'azote minéral, (II) apporter des engrais azotés, soit compatibles (c'est à dire n'inhibant pas la fixation de N_2), soit minéraux mais dans ce dernier cas trés judicieusement appliqués, (III) pratiquer la culture associée céréale-légumineuse. L'approche (I) vient d'être évoquée au paragraphe V.2.

Nous nous proposons maintenant d'étudier les approches (II) et (III).

V.3.1.1.1 - Faut il augmenter l'azote minéral en apportant des engrais azotés? (Essais IX)

D'aprés les conclusions d'un colloque tenu à Vienne en 1973 (GANRY 1974), conclusions fondées essentiellement sur les travaux de DART (PATE and DART 1961 ; DART and WILDON 1970 ; DART 1974), deux phases importantes dans la nodulation étaient distinguées :

- période initiale de formation des nodosités pendant laquelle les nitrates ont un effet inhibiteur très net, phénomène qui serait alors agissant surtout en sol sableux tropicaux en raison du pic de nitrification (paragraphe I.1.2.3 page 35);

- période secondaire, environ une semaine plus tard, pendant laquelle un autre groupe de nodosités se forme. Les nitrates sont beaucoup moins inhibiteurs dans cette période ; ils auraient même un effet stimulant pour un niveau de l'ordre de 10 ppm à 20 ppm.

Ces raisons ont prévalu dans la mise en place de l'essai IX en objet étudiant la réponse de l'arachide à des doses croissantes d'azote engrais.

De prime abord, l'étude de la réponse d'une légumineuse à l'engrais azoté peut paraître inopportune et contraire à notre objectif. Il s'agit pourtant du même objectif "économie de l'azote" que nous poursuivons, justifié par les hypothèses suivantes, découlant des mécanismes ci-dessus analysés :

- en début de cycle, l'apport d'azote engrais rapidement nitrifié (BLONDEL 1971), inhiberait la fixation de N_2, d'autant plus fortement que la dose d'azote serait élevée, en même temps qu'il accroîtrait le système racinaire ;

- lorsque la deuxième vague de nodulation intervient, le nombre de sites d'infection possibles permettant aux nodosités de se former, devrait être supérieur là où le système racinaire s'est mieux développé, en particulier on devrait enregistrer un effet positif de l'azote engrais starter. Par contre, aux fortes doses, l'azote engrais aurait vraisemblablement une action dépressive sur l'activité des nodosités de la deuxième vague en raison de sa rémanence dans le sol ; il serait donc sans intérêt agronomique. Mais cette dose élevée présente pour nous un autre intérêt, méthodologique, car elle donne un point utile dans l'expression graphique des courbes de réponse.

Les résultats sont présentés aux figures 25 et 26.

Le N total de l'arachide ne varie pas significativement en fonction des doses d'azote engrais : tout au plus apparaît-il une tendance de réponse parabolique avec maximum à 30 N correspondant à + 15 kg N total ha^{-1}. Le NdfF et, en conséquence, le CRU, sont corrélés positivement aux doses d'engrais (figure 25) ; en revanche, corrélativement, on observe une diminution expotentielle de la fixation de N_2 (NdfFix) quantifiable graphiquement (figure 26) et un accroissement du NdfS qui passe de 65 kg N-sol ha^{-1} à 84 kg N-sol ha^{-1} lorsque la dose d'azote engrais starter apportée passe de 15 à 60 N.

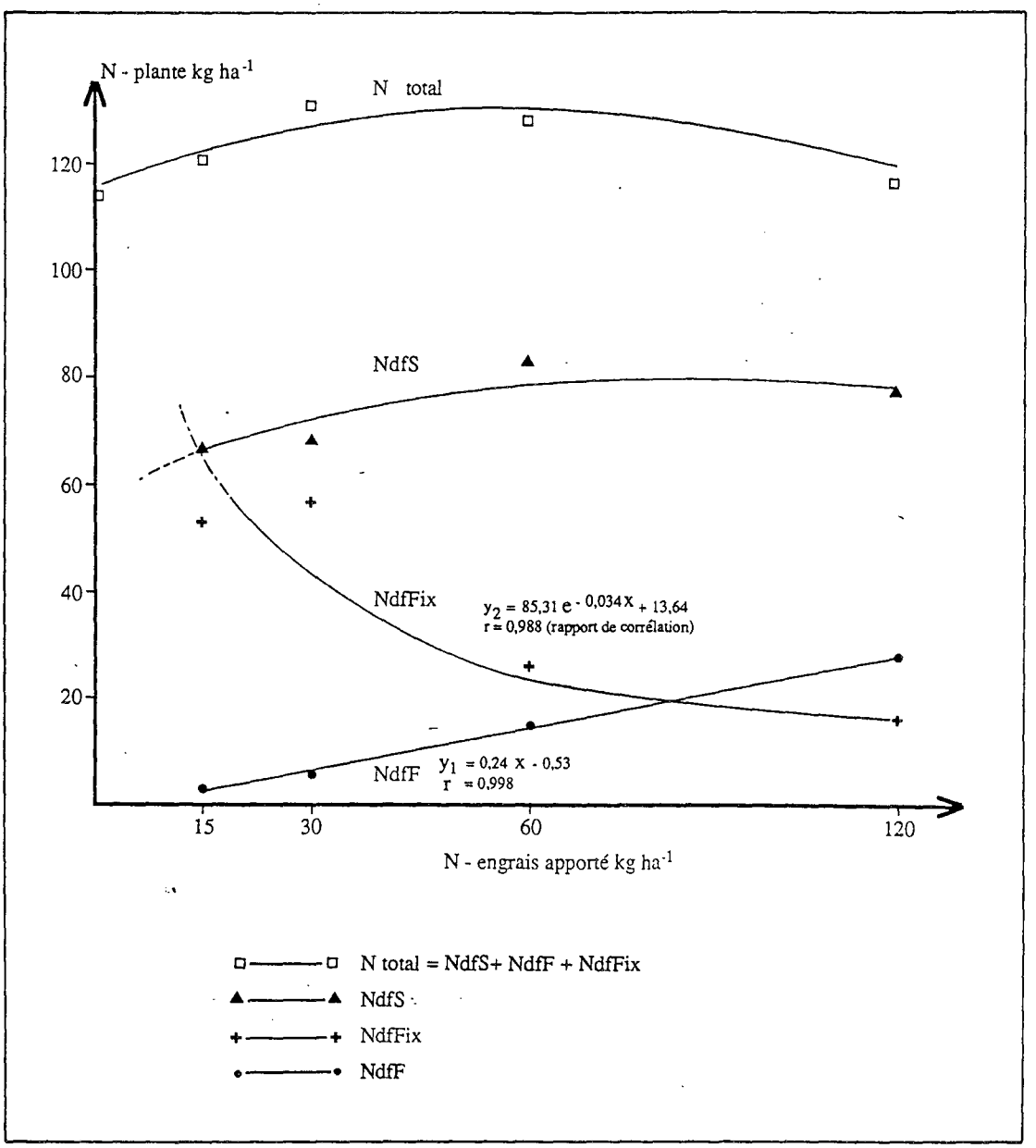


Figure 25 : Influence de la fumure azotée sur le N total, NdfS, NdfF et NdfFix d'une culture d'arachide. Bambey, essai IX.

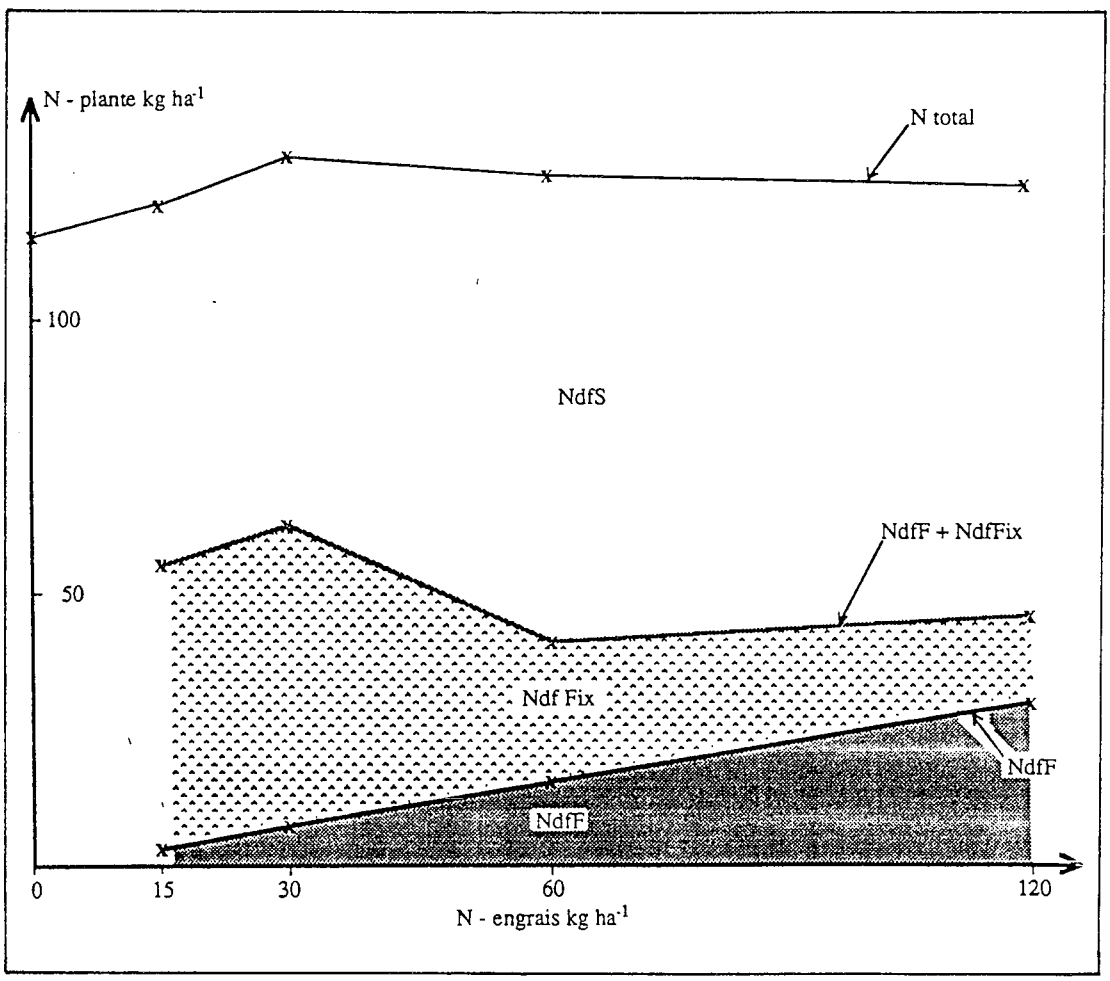


Figure 26 : Origine de l'azote absorbé par une culture d'arachide. Bambey, essai IX.

Sur arachide, en Inde, en trois points d'essai, SUBBA RAO (1976) observe un effet dépressif sur le rendement de l'engrais azoté starter même à des doses allant de 10 à 20 kg N ha^{-1}.

Sur soja, en revanche, il semble que l'effet de l'engrais azoté sur le rendement et la fixation de N_2 soit fortement dépendant de la variété, ce que nous montrons dans l'essai VIII aux tableaux 15 A et 19 A en annexe et que confirment RENNIE *et al.* (1982) et DOUKA (1986).

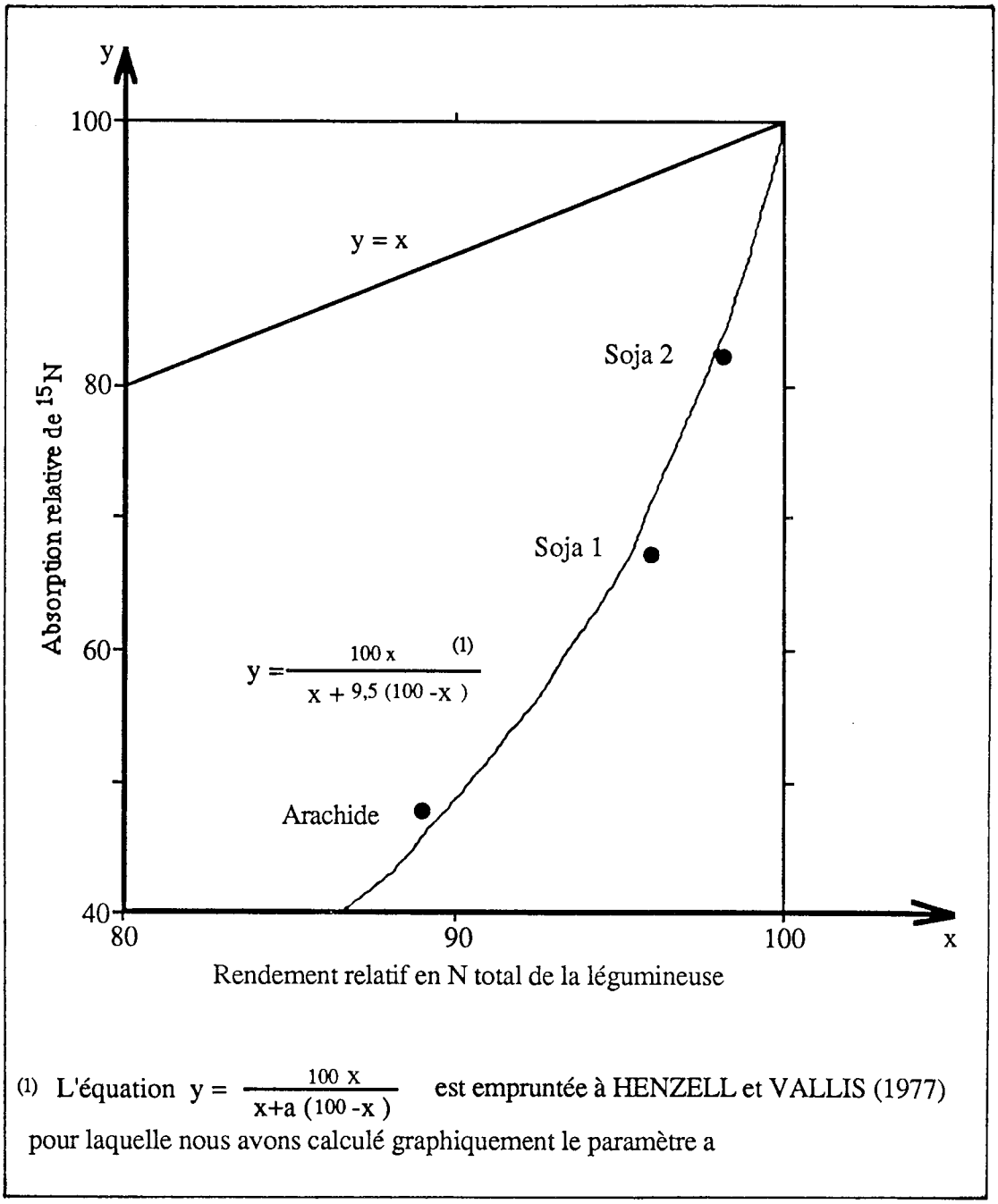
Nous pouvons conclure que le soja, présentant une réponse croissante à l'azote, la dose optimale, c'est-à-dire la dose à partir de laquelle apparaît l'inhibition de la fixation de N_2, varie d'une variété à l'autre ; chez l'arachide, nos résultats nous amènent à déconseiller la fumure azotée starter dont l'effet sur le rendement semble se produire au détriment des réserves d'azote du sol, et qui n'améliore pas l'économie de l'azote dans le système cultural.

V.3.1.1.2 - Faut-il réduire l'azote minéral en pratiquant la culture associée légumineuse-céréale ?
(Essai en lysimètre X)

Nos connaissances sur la fixation symbiotique de N_2 des légumineuses en culture pure, en particulier l'effet des facteurs environnementaux sur cette fixation, ont beaucoup progressé ces deux dernières décennies. En culture associée, ce sont principalement les légumineuses fourragères et de prairie qui ont fait l'objet d'études sur la fixation de N_2. HENZELL et VALLIS (1977) citant plusieurs auteurs estiment que **la proportion d'azote de la légumineuse dérivée de la fixation de N_2 (% NdfFix) est augmentée en culture associée légumineuse x graminée et peut atteindre jusqu'à 80 - 90 % ou plus parce que la graminée utilise la majorité de l'azote sol disponible** . Plus récemment FARIS et TA (1985) ont observé des transferts d'azote de *Medicago sativa* à *Phleum pratense* en culture associée permettant un accroissement de rendement en N total de *Phleum pratense* de + 25 %. En revanche peu d'études ont été entreprises, en zone tropicale semi-aride, sur la fixation de N_2 des légumineuses annuelles en culture associées, alors que par ailleurs les aspects agronomiques, physiologiques, protection des plantes et système d'exploitation, ont été et sont étudiés de façon approfondie par l'ICRISAT*.

---

* Institut de Recherche International pour les Céréales de la zone semi-aride.



(1) L'équation $y = \frac{100\,x}{x+a\,(100-x)}$ est empruntée à HENZELL et VALLIS (1977) pour laquelle nous avons calculé graphiquement le paramètre a

Figure 27 : Absorption relative d'azote 15 par la légumineuse cultivée avec le mil. Bambey, essai lysimétre X. Soja 1 : non inoculé, Soja 2 : inoculé.

Tableau 22 : Valeurs de N total plante en mg N lysimètre^{-1}, de l'excès isotopique (%) et du % NdfFix, pour le soja et l'arachide en culture pure ou associée. Essai en lysimètre X.

	N total mg lysimètre^{-1}		Excès isotopique %		% NdfFix	
	Pure	Associée	Pure	Associée	Pure	Associée
Soja$_1$ (1)	4164	5588	0.025	0.016	86	91
Soja$_2$ (1)	8282	7230	0.025	0.008	86	95
Arachide (2)	3681	2728	0.064	0.026	76	90
CV %	17.0		11.8		-	
ppds (P = 0,05)	1330		0,005		-	

Ce tableau résulte du tableau 22 A en annexe.

(1) 4 pieds de soja

(2) 2 pieds d'arachide

Tableau 23 : Valeur de N total plante en mg N lysimètre^{-1}, de l'excès isotopique (%) pour le mil en culture pure ou associée. Essai en lysimètre X.

	N total mg lysimètre^{-1}		Excès isotopique %	
	Pure	Associée	Pure	Associée
Mil (pur) et Mil_1 (associé)	530(1)	217(3)	0.174	0.195
Mil (pur) et Mil_2 (associé)	530(1)	150(3)	0.174	0.158
Mil (pur) et Mil_3 (associé)	290(2)	336(3)	0.253	0.272
CV %	23.8		7.5	
ppds (P = 0,05)	120		0,019	

Ce tableau résulte du tableau 22A en annexe.

(1) 4 pieds de mil

(2) 2 pieds de mil

(3) 1 pied de mil

Cette étude n'a pas la prétention de combler une lacune. Elle consiste en une expérience exploratoire conduite en lysimètre (essai X) fondée sur l'hypothèse selon laquelle le facteur "demande en azote" régit la fixation de N_2 ; en d'autres termes, s'il existe une "pompe" à azote minéral dans le système sol-légumineuse, (le mil en l'occurrence), la légumineuse va-t-elle accroître sa fixation ? Quel rendement en résultera-t-il ?

La méthode de la dilution isotopique, appliquée au sol marqué avec azote 15, permet le calcul de la fixation de N_2 selon la méthodologie développée au paragraphe III.2.2.2 page 66.

Les résultats sont présentés aux tableaux 22 et 23.

On observe que la culture mixte diminue significativement l'excés isotopique du soja et de l'arachide mais ne modifie pas significativement l'excés isotopique du mil (hormis l'augmentation enregistrée pour le mil 1, difficilement explicable).

Utilisant le même mode de représentation graphique que HENZELL et VALLIS (1977), l'ordonnée y représentant l'absorption relative d'azote 15 et l'abscisse x le rendement relatif de la légumineuse exprimé en N total, nous montrons, en accord avec ces auteurs, que la légumineuse est moins compétitive pour l'azote minéral que la céréale ce que traduit l'écart entre la droite y = x et la courbe de la forme :

$$y = \frac{100\,x}{x + a\,(100 - x)} \qquad \text{(figure 27)}$$

Evalué graphiquement dans le cas de la culture associée mil-légumineuse en sol dior, le paramètre "a" serait en moyenne de 9,5 ce qui conduit respectivement pour l'arachide, le soja 1 et le soja 2, à des valeurs de y calculées de 46, 71 et 84, qui sont proches des valeurs mesurées de 48, 68 et 82.

Par extrapolation, ceci signifie que dans une culture associée légumineuse (soja ou arachide) x mil, où la légumineuse produirait 50 % de N total, celle-ci n'utiliserait que 10 % de l'azote minéral absorbé en totalité par la légumineuse + la céréale.

De plus, nos résultats confirment l'effet "N-sparing" énoncé par VALLIS *et al.* (1967), effet de substitution d'une légumineuse à une non-légumineuse : "when legumes are substituted for non-legumes on a soil where the N supply is limiting, the remaining non-legumes are able to take up more mineral N per plant than they would in a pure stand of non-legumes".

Tableau 24 : Evaluation par lysimètre de la culture associée[1] sur l'indice "économie de l'azote" défini au paragraphe III.2.3.2.

$$\frac{\text{N minéral absorbé}}{\text{N total plante produit}}$$ [2]

	Culture pure de légumineuse	Culture associée légumineuse x mil
Soja 1	$\frac{583}{4164} = 0,14$	$\frac{501 + 217}{5588 + 217} = 0,12$
Soja 2	$\frac{1159}{8282} = 0,14$	$\frac{289 + 150}{7230 + 150} = 0,06$
Arachide	$\frac{920}{3881} = 0,25$	$\frac{273 + 336}{2728 + 336} = 0,20$

(1) Dans l'essai en objet, un lysimètre représente un système sol-plante qui contient en culture pure 4 légumineuses (soja ou arachide) et en culture associée 4 légumineuses (les mêmes) + 1 céréale (mil).

(2) L'essai I ne recevant pas d'engrais azoté,

$$\frac{\text{N minéral absorbé}}{\text{N total plante produit}} = \frac{NdfS}{NdfS + NdfFix}$$

L'explication de cet effet "N Sparing" adaptée à notre expérience est la suivante : la culture associée étant composée de n plantes : (n-1) légumineuses + 1 mil, le N total du mil ayant pour valeur z, l'effet "N-sparing" se produira si la culture pure de mil composée de n pieds de mil absorbe moins de n.z N total lysimètre^{-1}. Dans l'essai X en objet, pour mil 1, mil 2 et mil 3, les valeurs de n.z sont respectivement de : 1085 mg, 750 mg et 1008 mg ; ces valeurs (calculées) sont nettement au-dessus des valeurs (mesurées) atteintes par la culture pure du mil : de 530 mg pour quatre pieds de mil (mil 1 et 2) et 290 mg pour deux pieds de mil (mil 3).

Ces valeurs auraient atteint au plus :

$$\frac{290 \times 5}{2} = 725 \text{ mg avec cinq pieds de mil}$$

et

$$\frac{290 \times 3}{2} = 435 \text{ mg avec trois pieds de mil.}$$

On peut donc conclure qu'en condition de fourniture d'azote sol limitante, comme c'est le cas dans cet essai, la culture associée légumineuse x mil induit l'effet "N-sparing" (économie d'azote) évoqué ci-dessus. Cet effet économie de l'azote est confirmé par les résultats du tableau 24. Pour étayer cet effet, nous citons les travaux de BURTON *et al.* (1983) qui montrent que des variétés non nodulantes de soja ont un rendement en N total supérieur lorsqu'elles sont cultivées avec des variétés de soja nodulantes fixatrices.

Le soja en culture mixte a fixé 95 % de son azote contre 85 % en culture pure. L'arachide a fixé 90 % en culture associée contre 75 % en culture pure.

En ce qui concerne les transferts d'azote de la légumineuse à la graminée, infirmés par la non diminution de l'excès isotopique du mil, HENZELL et VALLIS (1977) estiment que ceux-ci ne sont généralement pas quantitativement significatifs à moins que la graminée puisse profiter de la minéralisation des tissus végétaux morts provenant de la légumineuse.

Les conclusions de cette première expérience fondées sur les indices "économie de l'azote" ou "N-sparing" de VALLIS (1967), sont positives ; **en particulier la culture associée accroît l'activité fixatrice de N_2 du soja et de l'arachide comparativement à la culture pure.** Elles confirment notre hypothèse de travail selon laquelle, le mil associé, absorbant l'azote minéral, "obligerait" la légumineuse, à fixer plus afin que sa demande en azote soit satisfaite.

V.3.1.2 - Amélioration de la fertilité par l'amendement calcique et organique (Essai XI)

Plusieurs auteurs, BOUHOT (1968), BLONDEL (1971), PIERI (1976), GANRY (1977), PICHOT *et al.* (1981) et WEY *et al.* (1987), ont montré que dans les sols sableux dégradés, la fumure minérale ne suffit pas pour maintenir la fertilité du sol ; au contraire, son application unique conduit progressivement à une régression sensible de la fertilité ainsi que probablement de l'activité biologique du sol. Déjà en 1956, à propos des engrais minéraux apportés sans discernement, BOUFFIL parlait 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 montré que cette chlorose azotée est causée par une réduction notoire de la fixation de N_2 de l'arachide et de la réserve en azote du sol. Lors de la mise en place du dispositif expérimental pluriannuel qui a servi de support à l'essai XI, cette chlorose azotée se manisfestait par des tâches jaunes, sans distinction de traitements, sur l'ensemble de l'aire expérimentale.

L'interprétation des résultats de l'essai XI nécessite le choix de la plante de référence; à 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.

Les valeurs A obtenues (tableau 25) montrent des différences entre le mil et l'arachide, marquées pour (a) et (b), mais peu marquées pour (c). L'explication réside vraisemblablement dans la profondeur du front d'humectation : (I) supérieure à 2 m dans le cas des deux premiers traitements, ayant entraîné un enracinement plus profond pour le mil que pour l'arachide, (II) limitée à 80 cm pour le traitement "fumier", l'enracinement du mil et de l'arachide ayant donc été contenu dans cet horizon (CISSE et VACHAUD 1988).

L'arachide non nodulante est la plante de référence retenue.

Les résultats sont présentés au tableau 26.

En absence d'amendements, le % 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^{-1}). La faible capacité du sol à fournir de l'azote (NdfS), d'environ 4 kg N ha^{-1} (l'arachide non nodulante a absorbé 22 kg N ha^{-1} dont 15 kg proviennent du sol et 7 kg de l'engrais azoté) explique ce plafonnement de N total à 16 kg N ha^{-1}, et permet de comprendre qu'une capacité fixatrice faible puisse entraîner un % NdfFix relativement élevé (un NdfFix de 6 kg N ha^{-1}, la moitié de celui mesuré, donnerait un % NdfFix encore assez élevé de 60 %).

Tableau 25 : Effet des amendements calcique et organique sur la valeur A et sur l'azote fourni par l'engrais et par le sol à deux plantes non fixatrices de N_2 (mil variété 3/4 ex-bornu et arachide non nodulante). Thilmakha, essai XI.

Traitement	N total		NdfF				NdfS		Valeur A	
			%		kg N ha^{-1}		kg N ha^{-1}			
	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	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
C.V. %	20	21	27	12	29	28	28	23		

Les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au test de Newman et Keuls.

Dose N-engrais = 76,8 kg N ha^{-1} E % = 0,780.

Ce tableau résulte du tableau 23 A en annexe.

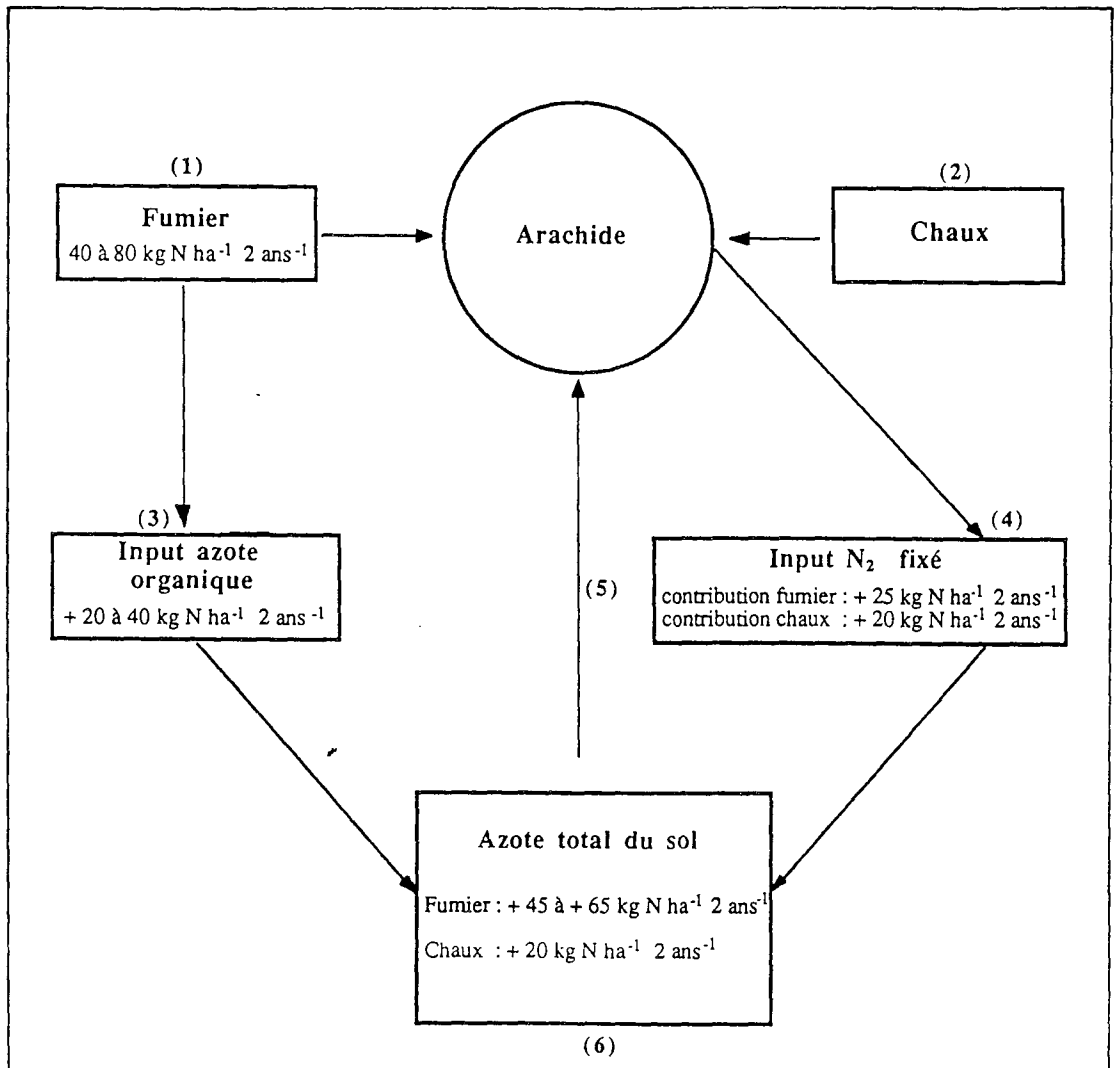
Tableau 26: Sources d'azote (exprimées en pourcentage de l'Ntotal plante ou en kg ha^{-1}) dans l'arachide variété 55-437 Thilmakha, essai XI.

Traitement	NdfF		NdfFix		NdfS		N total kg N ha^{-1}
	%	kg N ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	
Témoin	6,73 c	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	85,3
C.V. %	21,9	19,2	8,8	20,7	-	-	17,8

Les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au test de Newman et Keuls

Dose N-engrais = 13,9 kg N ha^{-1} E % = 4,94.

Ce tableau résulte du tableau 23 A en annexe.



(1), (2), (3), (4), (5) et (6) sont explicités à l'annexe 36 A
La contribution de la chaux et du fumier à l'azote total du sol est calculée sur la base des données de fixation de N_2 de l'essai XI en 1983 donc après onze ans de fonctionnement du système cultural.

Figure 28 : Schéma d'interprétation des effets de la chaux et du fumier (respectivement 0,6 et 10 t ha^{-1} 2 ans^{-1}) sur la régénération de la fertilité azotée du sol. Thilmakha, essai au champ XI.

En présence du fumier, le % NdfFix est accru significativement quoique faiblement : il passe de 67 % à 74 % ; le NdfFix également est accru mais dans une proportion beaucoup plus élevée : il passe de 11 à 63 kg N ha^{-1}. Le NdfS est de 20 kg N-sol ha^{-1} pour l'arachide nodulante et 38 kg N-sol ha^{-1} pour l'arachide non nodulante (tableaux 25 et 26).

Les effets de l'amendement calcique, vont dans le même sens que ceux de l'amendement organique ce qu'exprime le schéma de la figure 28. Les commentaires relatifs aux différents compartiments de cette figure, dans l'ordre de leur numérotation, sont données à l'annexe 36 A.

On admet que l'azote total du sol est constitué du pool d'azote qui participe au cycle interne de l'azote et d'un pool inerte constitué d'azote humique biologiquement trés stable en marge du cycle de l'azote (JANSSON 1963 cité par DOMMERGUES et MANGENOT 1970). Dans l'essai XI en objet, cet azote total dans l'horizon 0 - 40 cm est 600 kg N ha^{-1} pour les traitements témoin et chaulage et 750 kg N ha^{-1} pour le traitement fumier (tableau 36 A en annexe). Pour ces mêmes traitements, le pool d'azote mobilisable estimé conventionnellement par la valeur A obtenue sous mil (tableau 25) est respectivement de 95, 128 et 172 kg N ha^{-1} équivalent sulfate. Par différence, on peut estimer un stock d'humus très stable de 505, 472 et 578 kg N ha^{-1} respectivement pour les mêmes traitements témoin, chaulage et fumier. Ces résultats suggèrent que la fixation de N_2 (NFix) due à la chaux n'alimenterait que le cycle interne de l'azote et non l'azote humique stable qui a même tendance à diminuer ; seul le fumier alimente ce dernier.

En 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 du fumier à l'enrichissement de l'azote total du sol est au moins deux fois supérieure à celle de la chaux, celle-ci étant évaluée à 10 kg N ha^{-1} an^{-1}. Ces amendements accroissent le pool d'azote mobilisable du sol (valeur A) avec cependant une nette supériorité du fumier, et seul ce dernier accroît le pool d'azote humique biologiquement stable. On comprend dès lors que **la chaux soit apte à maintenir la productivité d'un sol non dégradé en culture continue**, avec cependant une tendance à la baisse de la teneur en matière organique du sol perceptible à long terme (NICOU et CHOPART 1989, non publié), **mais qu'elle soit insuffisante pour régénérer un sol dégradé**.

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, avait déjà été bien montré, il y a quelque 50 ans par SAGOT (1934) qui écrivait: "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".

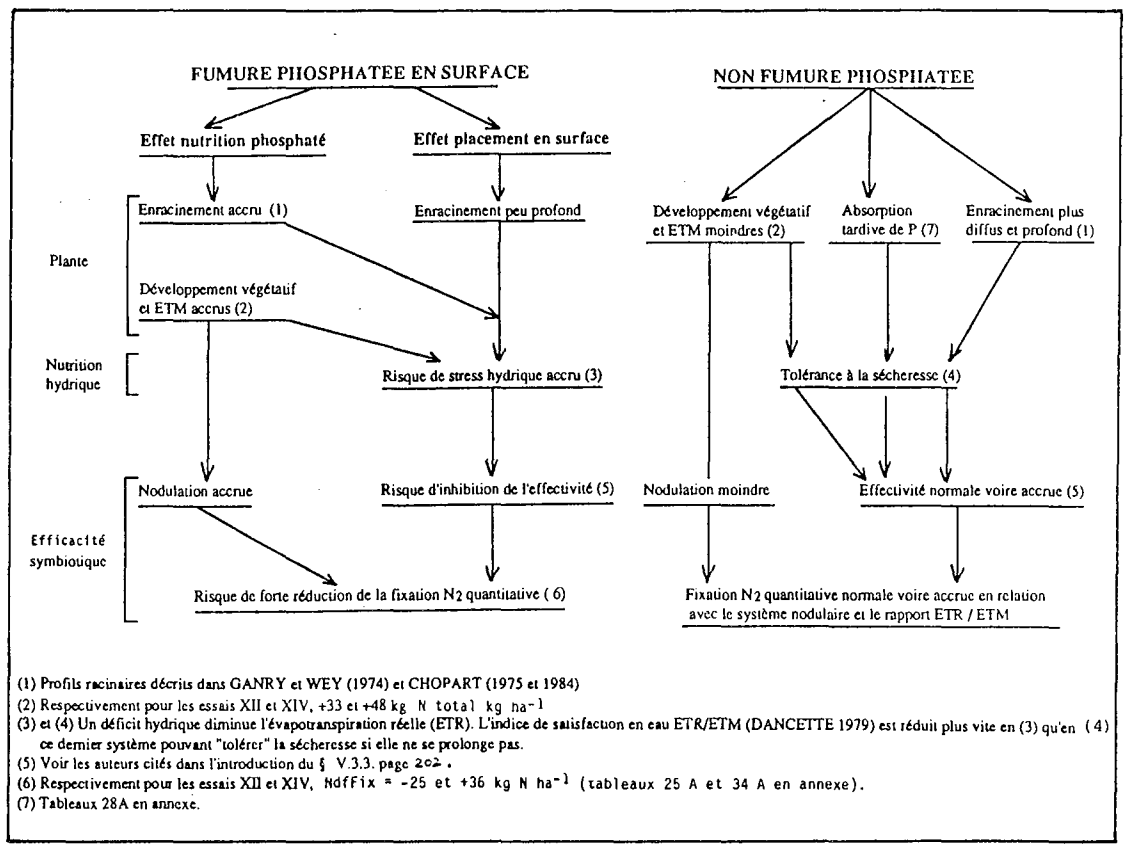
V.3.1.3. Amélioration de la fertilité par le phosphatage
(Essais au champ XII et XIV)

L'acide phosphorique est généralement considéré comme facteur essentiel d'amélioration des terres arables tropicales. Ce fait est particulièrement vrai pour les sols sableux du sud du Sénégal pour lesquels, dès 1950, les agronomes préconisaient pour les régions du Rip et de la Casamance, des formules plus riches en P_2O5 - et moins riches en K_2O - que pour les autres zones. La fumure phosphatée du soja, culture d'introduction récente dont l'extension géographique est limitée à la zone méridionale du Sénégal, revêt donc un intérêt primordial.

Au nord-Nigéria dans des zones édaphiques et climatiques semblables, d'importantes augmentations de rendement du soja ont été mises en évidence par apport de phosphate jusqu'à 17 kg P ha^{-1} (GOLDSWORTHY et HEATHCOTE 1964). Mais en plus du rendement, notre objectif est l'accroissement de la symbiose fixatrice de N_2. A ce sujet, des travaux antérieurs menés sur le soja ont montré que les besoins en phosphore pour une nodulation et pour une une fixation N_2 optimales sont supérieures aux besoins optimaux de la plante hôte (DE MOOY *et al.* 1973). Nous nous proposons de montrer s'il en est de même dans les conditions écologiques du Sud-Sénégal.

Le rendement, le N total et la fixation de N_2 sont évaluées quantitativement à partir des deux essais au champ XII et XIV dont les résultats sont présentés aux tableaux 25 A et 26 A en annexe pour l'essai XII et au tableau 34 A en annexe pour l'essai XIV. Contrairement à l'essai XIV, l'essai XII est affecté par une sécheresse post-floraison.

Dans l'essai XIV, le rendement, le N total et le NdfFix (mais pas le % NdfFix) sont sensiblement accrus par l'apport de phosphate ; mêmes observations dans l'essai XII hormis pour le NdfFix qui décroit significativement. Pour expliquer ce phénomène, l'hypothèse invoquée est le déficit hydrique à la période post-floraison, lequel, s'il ne diminue que peu le rendement et le N total, réduit fortement la fixation de N_2. La probabilité de ce déficit hydrique caractérisé par son intensité et sa période, est relativement grande, ce qu'illustre la figure 4 page 32. De plus la fertilisation phosphatée en surface, induisant un enracinement superficiel par ailleurs observé par GANRY et WEY (1974) et CHOPART (1975 et 1984), préjudiciable à l'économie de l'eau en période sèche, peut se révéler pire que l'absence de technique. Nous avons tenté d'exprimer ce processus dans les deux schémas de la figure 29.



(1) Profils racinaires décrits dans GANRY et WEY (1974) et CHOPART (1975 et 1984)
(2) Respectivement pour les essais XII et XIV, +33 et +48 kg N total kg ha^{-1}
(3) et (4) Un déficit hydrique diminue l'évapotranspiration réelle (ETR). L'indice de satisfaction en eau ETR/ETM (DANCETTE 1979) est réduit plus vite en (3) qu'en (4) ce dernier système pouvant "tolérer" la sécheresse si elle ne se prolonge pas.
(5) Voir les auteurs cités dans l'introduction du § V.3.3. page 202 .
(6) Respectivement pour les essais XII et XIV, NdfFix = -25 et +36 kg N ha^{-1} (tableaux 25 A et 34 A en annexe).
(7) Tableaux 28A en annexe.

Figure 29 : Schéma d'interprétation des effets de la fumure phosphatée en surface ou de la non fumure phosphatée (l'une évaluée par rapport à l'autre), sur l'efficacité symbiotique d'un soja affecté ou non par une sécheresse post-floraison. Séfa, essais au champ XII et XIV.

Appréciée en terme de risque sur le critère de l'économie de l'azote sol exporté, la technique de fertilisation phosphatée en surface est à déconseiller, l'incorporation en profondeur dans le sol du phosphate devant être vivement recommandée. Nous verrons au paragraphe V.3.2.4 page 198 qu'une inoculation par un champignon mycorhizien peut accroître sensiblement l'efficacité de cet engrais.

V.3.2. Contraintes biologiques

Parmi les micro-organismes impliqués dans la fixation symbiotique de N_2 des légumineuses, il y a bien évidemment les bradyrhizobiums, partenaires obligatoires dans la symbiose. Mais aussi, nous avons fait l'hypothèse que dans les conditions édaphiques des sols pauvres étudiés, les champignons mycrorhiziens endotrophes vésiculo-arbusculaires (VAM) pouvaient jouer un rôle important (DOMMERGUES 1977).

L'intervention sur la biomasse rhizobiale du sol peut être réalisée pour trois raisons:

a - les sols n'ont pas de rhizobiums : l'inoculation est alors nécessaire dans ces sols dépourvus de rhizobiums spécifiques (cas du soja au Sénégal traité dans les essais VIII, XII et XIV) ;

b - les sols sont défavorables à la nodulation et à la fixation de N_2 bien que possédant encore des rhizobiums : on doit y remédier afin d'éviter le dépérissement des cultures de légumineuses (cas du dépérissement de l'arachide au Sénégal traité dans l'essai XI) ;

c - les sols sont bien pourvus en rhizobiums ; dans ces sols à activité normale, on peut théoriquement améliorer l'efficience du système fixateur de N_2 en substituant une souche à une autre (cas de l'arachide au Sénégal traité dans l'essai XIII) à condition de résoudre le problème de la compétition.

L'intervention sur la biomasse mycorhizienne peut être envisagée dans les sols où le potentiel d'infection mycorhizienne est réduit.

V.3.2.1 - Les sols n'ont pas de rhizobiums spécifiques
(Essai au champ XIV).

L'inoculation est nécessaire dans les sols dépourvus de rhizobiums spécifiques pour les légumineuses récemment introduites : cas du soja et du stylosanthès au Sénégal (JARA 1981). Celle-ci serait nécessaire aussi dans les défriches récentes, après déboisement, où la flore microbienne n'est pas adaptée à la culture de l'arachide (SIBAND 1974). Cependant la culture répétée de l'arachide devrait permettre normalement le développement progressif des bradyrhizobiums du groupe *Vigna sinensis* (Cowpea). L'inoculation par une souche efficiente aurait l'avantage d'induire rapidement une fixation de N_2 élevée.

Nous avons étudié l'inoculation du soja dans un sol ferrugineux tropical lessivé "beige" du Sud Sénégal (essai au champ XIV). Elle a été réalisée avec *Bradyrhizobium japonicum* par la technique développée par WEY (1983).

L'interprétation des résultats de l'essai XIV nécessite le choix de la plante de référence; à cet égard, rappelons les trois traitements appliqués : un soja inoculé avec une souche de *Bradyrhizobium japonicum* inefficiente G1 (LAGACHERIE *et al.* 1977) mais compétitive, est comparé à un soja non inoculé au niveau de trois traitements : (a) sans phosphate, (b) avec super-phosphate triple, (c) avec phosphate naturel. (La même variété de soja est cultivée dans tous les traitements). Les valeurs "A" sont respectivement pour (a), (b) et (c) :

- soja inoculé avec G1 : 204, 246 et 216 kg N ha^{-1} équivalent $(NH_4)_2SO_4$,

- soja non inoculé : 245, 287 et 329 kg N ha^{-1} équivalent $(NH_4)_2SO_4$

Le soja non inoculé présente une légère nodulation due soit à des souches autochtones ou à une contamination ; les valeurs A sont supérieures à celles obtenues sur soja inoculé avec la souche inefficiente G1, indiquant que même si ce dernier a fixé une petite quantité d'azote, cette fixation est inférieure à celle du soja non inoculé.

Le soja inoculé avec la souche inefficiente G1 a donc été choisi comme plante de référence.

Les résultats sont présentés au tableau 27. Nos commentaires portent sur les résultats de la simple inoculation avec *Bradhyrhizobium japonicum*.

Non inoculé, mais fertilisé avec 90 kg N ha^{-1} (sulfate) le soja variété ISRA - IRAT 26/72, a absorbé 94 kg N sol ha^{-1} (NdfS) pour 127 kg N total ha^{-1} ; inoculé, avec seulement une dose d'azote starter (17 N), le N total est accru (+ 34 kg N ha^{-1}) alors que le NdfS est sensiblement réduit (- 50 kg N-sol ha^{-1}).

Nous concluons que dans les conditions de sol du Sénégal, la culture de soja requiert obligatoirement l'inoculation pour éviter un épuisement rapide du pool d'azote du sol.

V.3.2.2 - Les sols sont défavorables à la nodulation et à la fixation de N_2

La régénération de la biomasse rhizobiale a été étudiées à Thilmakha (essai XI) où la dégradation prononcée de la fertilité a entrainé un effondrement de la biomasse rhizobiale

(DREVON 1981). Cette étude de la régénération est développée au paragraphe V.3.1.2 page 189 où nous avons vu que les techniques de régénération (amendements) font passer le NdfFix de 5 à 25 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1}.

V.3.2.3 - Les sols sont bien pourvus en rhizobiums, mais on veut accroître leur efficience

Il ne suffit pas d'introduire une souche active au sol pour induire une fixation de N_2. Encore faut-il que cette souche survive dans des conditions d'environnement défavorables (acidité du sol, température du sol, sécheresse) et soit suffisamment compétitive et infective.

Les techniques couramment utilisées, telles que l'inoculation des graines, conduisent le plus souvent à des échecs : l'enrobage affecte la germination des graines et l'infection des racines se fait très mal. Cette raison a conduit JUNG *et al.* (1982) à développer la technique d'inclusion des rhizobiums dans un gel de polymère, et WEY, dès 1973 (WEY 1974), à mettre au point au Sénégal l'inoculation du sol qui a donné d'excellents résultats sur soja (WEY 1983).

L'absence d'effet de l'inoculation de l'arachide vérifiée par le passé (WEY 1974), voire ses effets négatifs (SUBBA RAO 1976), est attribuée d'une part au caractère non spécifique de l'arachide (promiscuité) vis à vis des rhizobiums et d'autre part à la compétivité des souches natives. Cette absence d'effet de l'inoculation nous a conduit à reprendre l'analyse des mécanismes régissant l'apparition des nodules en début de cycle (paragraphe V.3.1.1 page 178), en particulier la deuxième période d'apparition des nodules, analyse qui suggère qu'une inoculation tardive, réalisée après un apport de nitrate au semis en vue d'accroître le développement du système racinaire, devrait augmenter considérablement les sites d'infection; il en résulterait une nodulation plus abondante, laquelle ne serait pas génée par les nitrates, disparus du profil à ce moment là (après la phase de nitrification).

Ces raisons justifient le traitement inoculation retardée mis en place dans l'essai XIII en objet dont les résultats sont présentés au tableau 28.

Contrairement à l'inoculation au semis, on montre, effectivement, que l'inoculation retardée a un effet positif significatif sur le rendement et la fixation de N_2 ; elle n'accroît pas l'exportation d'azote sol (output), qu'elle aurait même tendance à réduire.

V.3.2.4. Les sols sont dépouvus ou mal pourvus en champignons mycorhyziens

Il est maintenant bien établi que l'infection mycorhizienne améliore la nutrition phosphatée de la plante hôte, en particulier dans les sols carencés en phosphore. Encouragé

Tableau 27 : Effet de l'inoculation simple avec Bradyrhizobium japonicum (R) et de l'inoculation double avec B. japonicum plus Glomus mosseae (RM) sur la contribution des sources d'azote au rendement du soja - Séfa, essai XIV.

Traitements	Sous-traitements	N-total	Source d'azote					
			NdfF		NdfS		Ndf Fix	
		kg N ha^{-1}	%	kg N ha^{-1}	%	kg N ha^{-1}	%	kg N ha^{-1}
R - 17 N	OP	112.0	2.6	2.8	32.1	36.0	65.3	73.1
R - 17 N	Super	161.0	2.0	3.1	30.3	48.8	67.7	109.0
R - 17 N	P naturel	150.0	2.0	2.9	24.6	36.9	73.4	110.3
RM - 17 N	OP	120.0	2.6	3.1	30.6	36.7	66.8	80.2
RM - 17 N	Super	183.7	1.6	3.0	22.6	41.5	75.8	139.3
RM - 17 N	P naturel	152.0	2.1	3.2	26.5	40.2	71.4	108.6
ppds : entre traitements principaux au niveau d'un même sous-traitement			0.40	N.S	-	-	5.3	14.5
ppds : entre sous-traitements au niveau d'un même traitement principal			0.44	N.S	-	-	5.7	13.4

Tableau 28 - Effet de l'inoculation par le rhizobium sur l'origine de l'azote absorbé par l'arachide, Bambey essai XIII.

Traitements			N total	NdfF		NdfFix		NdfS	
Souche	méthode	date	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%
Témoin	-	-	102.6	2.2	2.1	67.5	65.8	32.9	32.1
CB-756	graines	semis	104.4	2.1	2.0	71.9	68.9	30.4	29.1
Su-430	graines	semis	104.8	2.4	2.3	73.3	69.9	29.1	27.8
CB-756	Sol	semis	105.1	2.3	2.2	73.6	70.0	29.2	27.8
Su-430	Sol	semis	104.9	2.0	1.9	70.2	66.9	32.7	31.2
CB-756	Sol	2 semaines	118.5	2.5	1.3	84.5	71.3	31.6	26.7
Su-430	Sol	2 semaines	109.5	1.8	1.6	82.4	75.2	25.3	23.1
CV %			7.4	8.5	-	15.7	-	-	-
ppds (P = 0,05)			12.1	0.30		8.1		-	

Ce tableau résulte des tableaux 32 A et 33 A en annexe.

par les premiers résultats obtenus au Sénégal (GIANINAZZI-PEARSON et DIEM 1982 ; OLLIVIER *et al.* 1983) en raison de la forte carence en phosphore assimilable des sols ferrugineux tropicaux (paragraphe V.3.1.3 page 194), nous avons réalisé un premier essai au champ, dont les résultats furent concluants (GANRY *et al.* 1982). Le deuxième essai au champ, essai XIV en objet, fut réalisé sur un terrain préalablement choisi pour son faible potentiel d'infection VAM (l'expérience relative au choix du terrain a été réalisée par DIEM citée dans GANRY *et al.* 1985). Dans l'essai XIV, nous avons étudié l'inoculation du soja avec *Bradyrhizobium japonicum* et *Glomus mosseae*, un champignon mycorrhizien vesiculo-arbusculaire (VAM), inclus dans l'alginate par la technique développée par DIEM *et al.* (1981).

Comme nous l'avons déjà signalé au paragraphe V.3.2.1. la plante de référence choisie est le soja, inoculé avec la souche inefficiente G1.

Les résultats sont présentés au tableau 27 page 199.

Ils montrent un effet positif significatif de l'inoculation par *Glomus mosseae*, mais seulement en présence de phosphate supertriple, sur le rendement (N total = + 23 kg N ha^{-1}) et la fixation de N_2 (NdfFix = + 30 kg N ha^{-1}).

Comparant les résultats obtenus en 1980 (GANRY *et al.* 1982) et 1982 (essai XIV, présent paragraphe), dans les parcelles fertilisées par le phosphate et inoculées par *Glomus mosseae*, nous montrons que le NdfFix est deux fois plus élevée en 1982 (139 kg N ha^{-1}) qu'en 1980 (63 kg N ha^{-1}). De même, le % NdfFix est deux fois plus élevé en 1982 (76 %) qu'en 1980 (41 %). Ces différences sont attribuées à la sécheresse post-floraison survenue en 1980 (figure 11 A page 320).

Par contre, dans les parcelles fertilisées avec le phosphate, l'accroissement de la fixation de N_2 induite par l'inoculation par *Glomus mosseae* est identique en 1980 (+ 29 kg N ha^{-1}) et dans l'expérience de 1982 (+ 30 kg N ha^{-1}). De même, l'accroissement de rendement en grains dû à l'inoculation par *Glomus Mosseae* est approximativement le même en 1980 (+ 302 kg M.S ha^{-1}) et en 1982 (+ 273 kg M.S ha^{-1}).

En 1982, l'effet bénéfique de l'inoculation par les VAM est attribué au fait que celles-ci ont induit une infection précoce du système racinaire se développant dans un sol à faible potentiel d'infection par les VAM tandis qu'en 1980, l'effet de l'inoculation était principalement attribué au fait que durant la période de sécheresse, survenue en cours de cycle, les VAM ont accru la tolérance à la sécheresse du soja (SPRENT 1975 ; GIANINAZZI-PEARSON et DIEM 1982).

L'inoculation par les VAM (*G. mosseae*) présente le double avantage d'accroître le rendement en protides (+ 16 kg N ha^{-1} en 1980 et + 23 kg N ha^{-1} en 1982) sans augmenter la fourniture d'azote par le sol, donc sans augmenter l'output azote sol, celle-ci est même réduite significativement (- 18 kg N ha^{-1} en 1980 et - 7 kg N ha^{-1} en 1982). **On conclut, que dans le cas où les populations endomycorhiziennes sont faibles, l'inoculation du soja par les VAM permet d'accroître le rendement et l'indice de rendement (harvest index) sans altérer les réserves en azote du sol.**

En ce qui concerne l'économie possible d'engrais phosphaté par action des VAM, en accord avec DOMMERGUES (1982), nous constatons que dans ce sol fortement carencé en phosphore assimilable, une certaine quantité de phosphate soluble est nécessaire pour obtenir une réponse significative de l'inoculation par les VAM. En d'autres termes, il apparaît que les **VAM ne peuvent remplacer l'engrais phosphaté mais en accroissent l'efficacité permettant ainsi une réduction de leur dose d'application** que nous allons tenter de chiffrer.

Toujours dans l'essai XIV en objet, en faisant l'hypothèse d'une réponse logarithmique au phosphate, généralement observée, de la forme y = b + a Log x (BATIONO *et al.* 1985) dans laquelle y est le rendement grain en kg M.S ha^{-1}, et x la dose de phosphate supertriple en P kg ha^{-1}, nous obtenons y = 1431 + 278 Log x. (Sur arachide, en Gambie, dans un sol ferrugineux tropical, BATIONO *et al.* (1985), trouvent une fonction assez proche : y = 910 + 284 Log x). Pour escompter le rendement en grain de 2017 kg M.S ha^{-1} obtenu dans cet essai sous l'action de l'inoculation par bradyrhizobium seul en présence 22 kg P ha^{-1} sous forme de phosphate supertriple, seulement de 8 kg P ha^{-1} seraient suffisants (3 kg P ha^{-1} en 1980) à condition de réaliser la double inoculation bradyrhizobium + VAM ; la réduction de dose serait alors de 14 kg P ha^{-1} soit 65 % de la dose apportée (85 % en 1980). **L'économie d'engrais phosphaté réalisée est alors substantielle.**

Nous concluons que dans les conditions de sol du Sénégal, la culture du soja justifie au plan économique l'inoculation par *Glomus mosseae* dans les terrains à faible potentiel d'infection mycorhizienne

V.3.3. Contrainte climatique

En conditions semi-arides, le stress hydrique, conséquence de la faible pluviosité, est un facteur limitant majeur (SPRENT 1972 ; PANKHURST et SPRENT 1975 ; BALANDREAU et DUCERF 1980 ; GIBSON *et al.* 1982).

V.3.3.1 - Relation entre la pluviométrie et la fixation de N_2

Essais au champ IX et XIII pour l'arachide, XII et XIV pour le soja

Avant la présentation des résultats, il nous parait nécessaire de préciser les limites de validité de la relation entre la pluviométrie et la fixation de N_2.

Pour un agrosystème donné (système présentant donc un équilibre avec les conditions pédoclimatiques du lieu), pour un itinéraire technique donné, sous une pluviométrie suffisante, on peut approcher un rendement potentiel (TOURTE *et al.* 1966). Exprimé en N total de la plante entière, en culture intensive, ce rendement est pour l'arachide de l'ordre de 90 kg N ha^{-1}, 120 kg N ha^{-1} et 150 kg N ha^{-1}, respectivement à Thilmakha, Bambey et Séfa. En raison de cette variation du rendement liée à la zone écologique et à l'itinéraire technique (celui-ci est adapté à la zone), il est donc important de n'effectuer les études de corrélation entre pluviométrie et quantité de N_2 fixé (NdfFix), que dans une même zone écologique et pour un même itinéraire technique du fait de la relation NdfFix = % NdfFix x N total. Ainsi pour un même sol et un même itinéraire technique, seules les variations de pluviosité peuvent modifier le rendement avec une importance relative selon le déficit hydrique induit, caractérisé par son intensité et sa période dans le cycle de la plante, ce dernier facteur semblant être prépondérant (TOURTE *et al.* 1966). Qu'en est-il pour la fixation de N_2 ?

En ce qui concerne l'arachide, les résultats figurent aux tableaux 21 A (essai IX) et 33 A (essai XIII) en annexe. Leur comparaison fait ressortir une différence de fixation attribuée à une différence de pluviosité (figures 9 A et 10 A en annexe). La fixation de N_2 (NdfFix) par l'arachide spontanément nodulée par le bradyrhizobium autochtone, exprimée en % et kg N ha^{-1}, est dans l'essai IX (pluviosité inadéquate) respectivement de 44 et 52, tandis que dans l'essai XIII (pluviosité adéquate) ces valeurs sont de 66 et 67.

Ces résultats ainsi que les résultats d'un essai similaire réalisé par nous-mêmes (GANRY et WEY 1977) permettent d'établir une relation entre la pluviométrie en mm an^{-1} et la fixation de N_2 (NdfFix), différente de celle existant entre la pluviométrie et le rendement dans l'intervalle de pluviométrie considéré (figure 30).

En ce qui concerne le soja, les résultats figurent aux tableaux 25 A (essai XII) et 34 A (essai XIV) en annexe. Leur comparaison fait ressortir, une différence de fixation, attribuée à une sécheresse en cours de cycle (figure 11 A et 13 A en annexe). Nous montrons en effet qu'en conditions de déficit hydrique la fixation est fortement inhibée : % NdfFix = 26 et NdfFix = 37 kg N ha^{-1} pour un rendement en grains de 16 q M.S ha^{-1} dans l'essai XII, au lieu de : % NdfFix = 70 et NdfFix = 109 kg N ha^{-1} pour un rendement en grains de 20 q M.S ha^{-1} dans l'essai XIV sous une pluviométrie normale. La conséquence la plus néfaste du déficit hydrique est d'accroître nettement le NdfS qui passe de 40 kg N ha^{-1} (essai XIV) à 100 kg N ha^{-1} (essai XII).

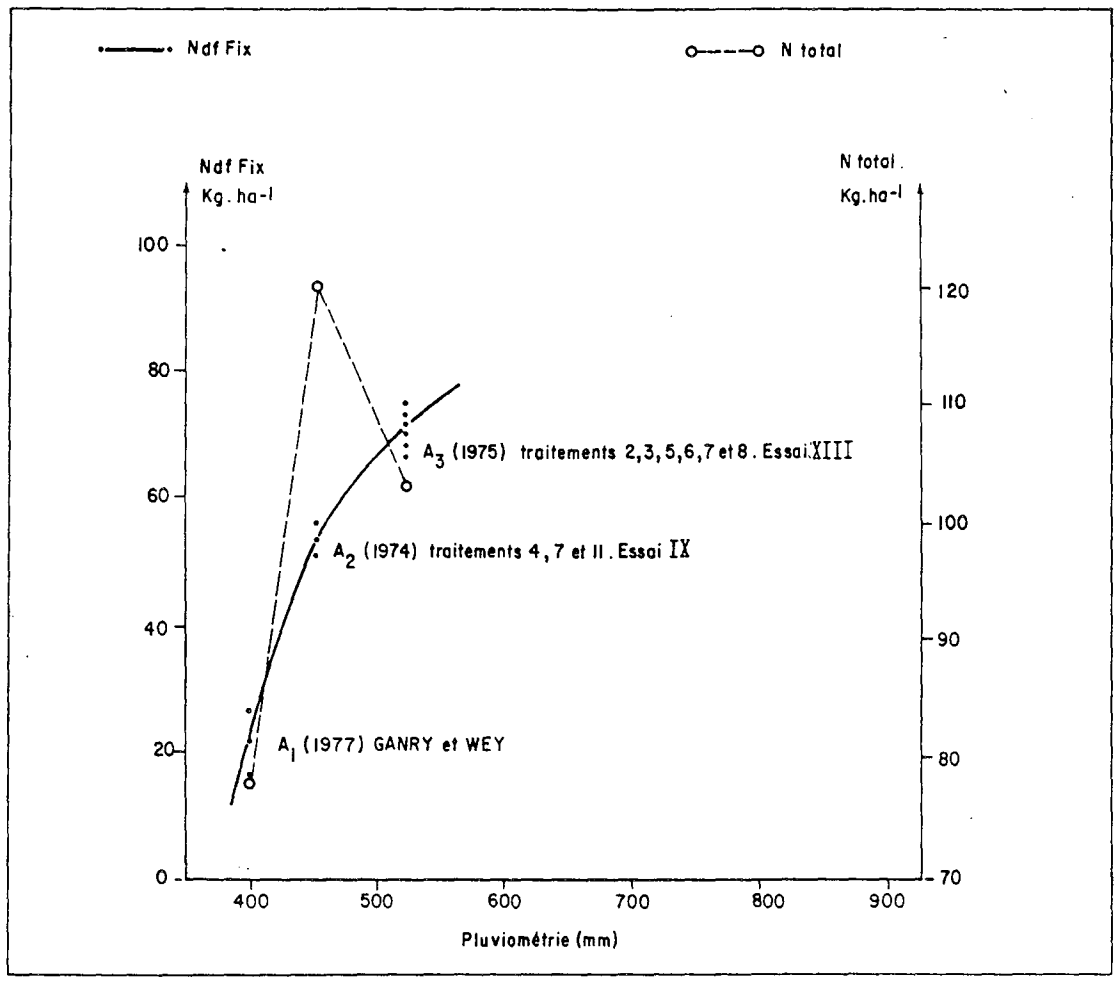


Figure 30 : Relation entre NdfFix de l'arachide (kg N ha^{-1}) et la pluviométrie (mm an^{-1}) (en trait interrompu variation concomitante de N total.

A3 : traitements 2, 3, 5, 6, 7 et 8, essai au champ XIII

A2 : traitements 4, 7 et 11, essai au champ IX

A1 : GANRY et WEY (1977).

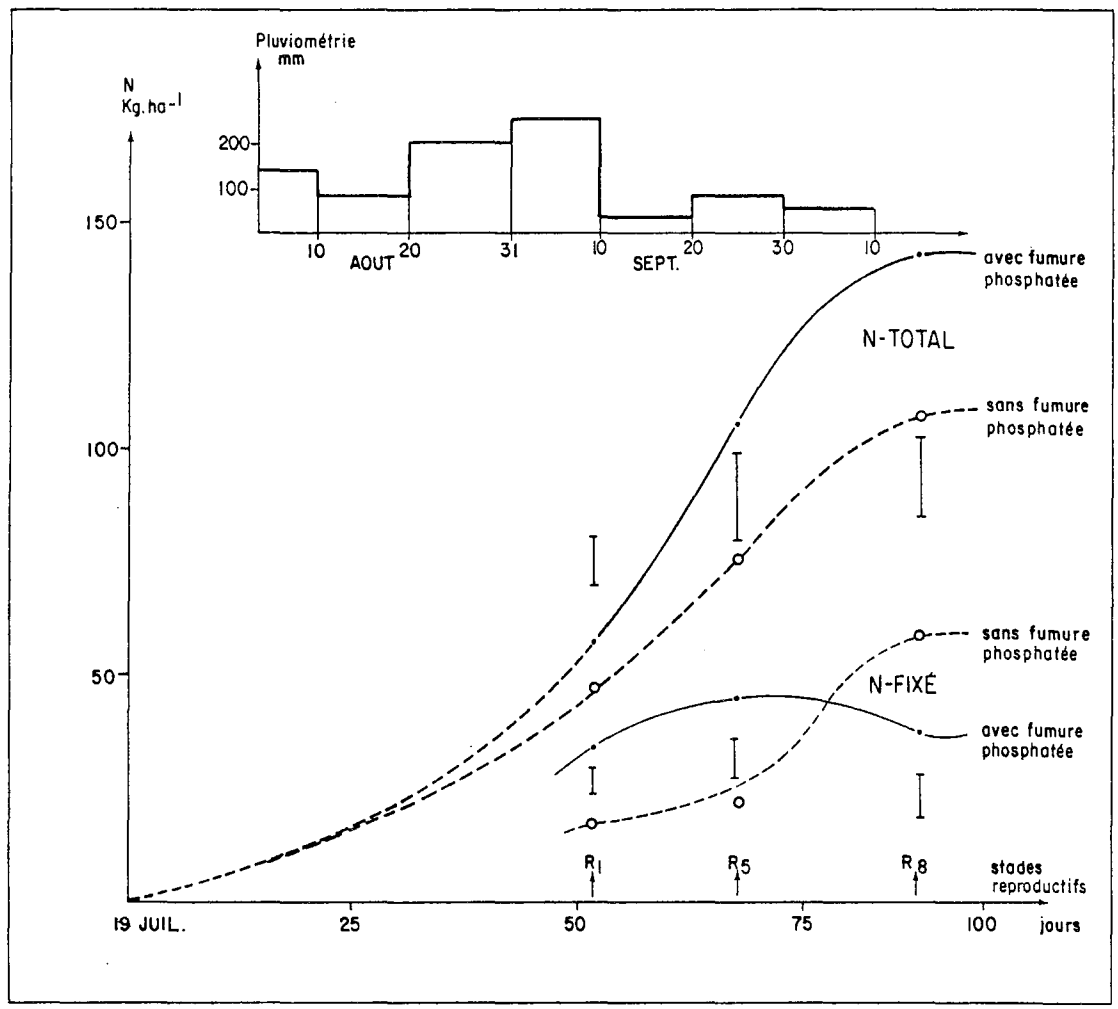


Figure 31 : Evolution en cours de cycle du soja, de N total et de NdfFix exprimés en kg N ha^{-1} en présence ou absence de la fumure phosphatée. R1, R5 et R8 : stades reproductifs - Séfa, essai au champ XII.

V. 3.3.2 - Déficit hydrique et fixation de N_2 en cours de cycle
(Essai au champ XII)

Les résulats de l'essai XII sont illustrés à la figure 31. Cette figure nous permet d'interpréter les courbes relatives au N total (courbes 1 et 2) et au NdfFix (courbes 3 et 4) en cours de cycle, en relation avec la pluviométrie. Nous en tirons les enseignements suivants:

- **En conditions d'alimentation hydrique optimales**

Des mesures quantitatives de fixation de N_2 faites sur le soja sans phosphate qui a le mieux toléré la sécheresse (du fait d'un développement végétatif moindre, conséquence d'une carence en phosphore), il ressort que la courbe du N total suit approximativement celle du NdfFix dés le début du stade de remplissage des gousses. En effet, à partir de ce stade, le NdfS de ce soja reste invariable : environ 50 kg N ha^{-1}, ce qui montre que l'absorption d'azote du sol devient alors négligeable. **En conséquence, en conditions d'alimentation hydrique optimales du soja dans sa phase reproductive, la demande supplémentaire d'azote liée à son développement végétatif serait assurée par la fixation de N_2.**

- **En conditions d'alimentation hydrique sub-optimales**

Lorsque le sol se déssèche, on sait qu'en dessous d'un certain taux d'humidité, variable suivant les types de sols, la fixation de N_2 est nulle ou négligeable (SPRENT 1972; PANKHURST et SPRENT 1975). En sol sableux tropicaux, cette humidité est de 4,5 % pour le système "sol dior-arachide" (DUCERF 1978). Le point de flétrissement des plantes en sol sableux dior se situe vers 1,5 - 2 % d'humidité pondérale ; dans le sol de Séfa, plus riche en argile, il se situe vers 5 % (CHARREAU et NICOU 1971). On peut donc admettre qu'il existe un gradient d'humidité du sol entre ce point de fixation de N_2 nulle et le point de flétrissement, qui permet le développement végétatif du soja, devenu alors non fixateur. C'est le cas du soja fertilisé avec le phosphate apporté en surface dont le développement végétatif a été accru par l'apport de cet élément. **En conséquence, en conditions alimentation hydriques sub-optimales du soja, dans sa phase reproductive, toute demande supplémentaire en azote liée à son développement végétatif, serait assurée par le sol.**

Le soja viendrait alors en tête des plantes pour leur capacité d'extraction de l'azote du sol, soit, sur la base de 100 kg N-sol ha^{-1} absorbés, trois fois plus qu'une culture de mil intensive, ce qui représente sur 30 cm environ 7 % des réserves d'azote soluble évaluée par nous-mêmes (GANRY non publié) selon la technique DECAU (1968). Dans ces conditions d'alimentation hydrique déficitaire pour la fixation de N_2, l'épuisement rapide des réserves en azote du sol est prévisible.

La capacité du soja inoculé à satisfaire sa demande en azote par le moyen de la fixation de N_2 semble dépendre étroitement de sa capacité à tolérer la sécheresse. L'alimentation hydrique dépend de la réserve utile en eau du sol et de l'enracinement qui prospecte cette réserve ; elle est donc fonction du système racinaire de la variété (SAINT-MACARY *et al.* 1981), mais aussi de certaines techniques culturales telles que le travail du sol, l'enfouissement des phosphates et la date de semis (CHARREAU et NICOU 1971 ; KEYA 1975; IRAT - INFORMATIONS 1980 et CHOPART 1980).

V. 3.3.3 - Conclusion

L'alimentation hydrique est devenue la principale contrainte ces quinze dernières années suite à la baisse significative de la pluviosité que nous avons évoquée au paragraphe I.1.1 page 28. On se reportera aux figures 3 et 4 pages 31 et 32 qui illustrent l'importance des trois principaux facteurs affectant cette alimentation hydrique : la pluviométrie, l'intensité et la date de la période sèche intra-saison des pluies. On remarquera en particulier **le décrochement des courbes de pluviométrie,** pour les trois courbes fréquentielles et pour les quatre stations, **apparaissant à la deuxième décade d'août. Cette période correspond généralement à la phase de fixation de N_2 des légumineuses annuelles potentiellement maximale.** On peut d'ores et déjà appréhender l'ampleur de la dégradation de la fertilité azotée du sol à long terme si des techniques appropriées ne sont pas mises en oeuvre pour éviter que cette réduction de la pluviosité ne devienne stress hydrique. Les méthodes d'investigations devront impérativement étudier l'activité racinaire en condition hydrique limitante et déterminer, pour une situation donnée, **l'indice de satisfaction en eau ETR/ETM critique en deçà duquel la fixation de N_2 est inhibée.** Les techniques culturales devront permettre à la plante d'exploiter au maximum l'humidité du sol (accroître l'ETR) et d'abaisser le seuil critique de l'indice de satisfaction ETR/ETM (mais est-ce possible ?) en deçà duquel la fixation de N_2 est inhibée ; en revanche, certaines techniques culturales devraient permettre d'accroître l'indice de satisfaction en eau aux stades reproductifs importants.

A l'instar de l'efficience de l'eau définie par les bioclimatologistes par le rapport kg grain ha^{-1}/mm ETR, pour laquelle on a montré l'effet bénéfique de certaines techniques culturales, **il serait opportun de définir un rappport NdfFix/mm ETR permettant d'évaluer des variétés ou des techniques sur le double critère "économie de l'azote" et "économie de l'eau".**

V.4 - Conclusion du chapitre V

L'économie de l'azote dans le système sol-légumineuse est essentiellement régie par l'aptitude variétale et la fixation de N_2 relative (% NdfFix). Celle-ci est fonction de l'efficacité

des populations de rhizobiums et de champignons mycorhiziens, et de différents facteurs environnementaux, notamment (a) l'alimentation hydrique principalement conditionnée par le régime pluviométrique (intensité et distribution) mais aussi par le profil de l'enracinement lié en particulier au mode de placement de l'engrais phosphaté, (b) la concentration de la solution du sol en azote minéral, accrue lorsque le sol se dessèche. La figure 32 résume l'effet de ces facteurs sur le soja et l'arachide.

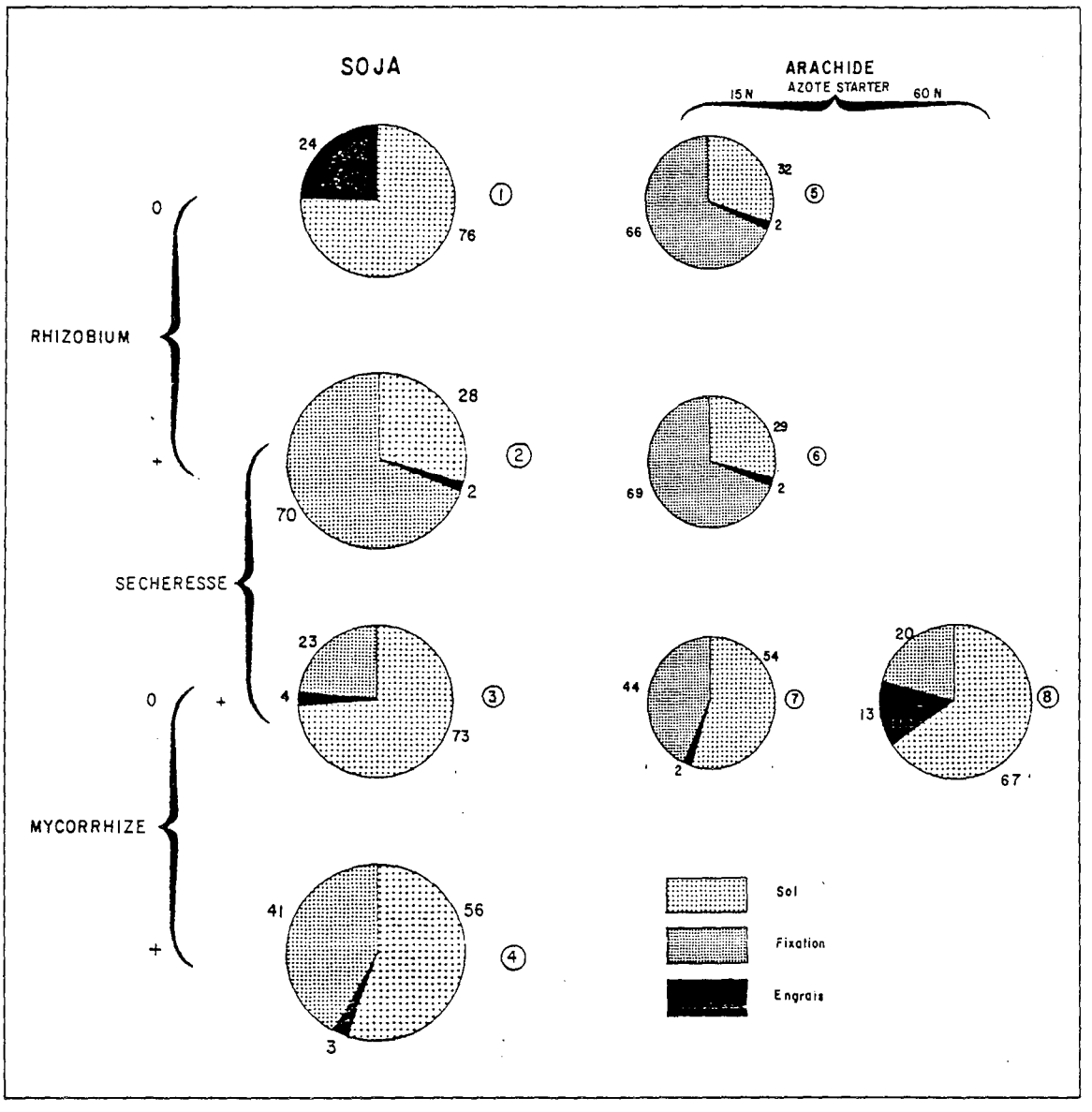


Figure 32 : Variation de % NdfFix, de % NdfS et de % NdfF chez le soja et l'arachide sous l'action de différents facteurs : hydrique (soja et arachide) ; inoculation par une souche Bradyrhizobium Japonicum + Glomus mosseae (soja) ; fumure azotée starter (arachide). Le diamètre des cercles est proportionnel au N total des plantes. Les numéros (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) et (8) correspondent aux essais au champ suivants : N° XII, XII, IX, XIII, XIII, IX et IX;
le numéro (4) correspond à la référence (GANRY et al. 1982).

CHAPITRE VI - MAITRISE DES FLUX D'AZOTE DANS TROIS SYTEMES DE CULTURE.

VI.1 - Principes régissant la manipulation des flux d'azote dans les systèmes de culture

VI.2 - Application des principes définis ci-dessus à trois systèmes de culture

VI.2.1 - Le système de culture mil-arachide de Thilmakha en zone sub-sahélienne

VI.2.2 - Le système de culture mil-arachide à Bambey en zone soudanienne nord

VI.2.3 - Le système de culture maïs-soja à Séfa en zone sub-guinéenne

VI.3 - Conclusion du chapitre VI

La culture exerce une action directe sur les propriétés des sols et le profil cultural ; notamment, elle enrichit ou appauvrit le sol en azote (par les flux et transferts que nous avons décrits paragraphe II page 46 et 47). Elle intervient donc sur les rendements agricoles des plantes qui lui succèdent. Ainsi, les successions culturales ne correspondent pas à une "simple juxtaposition de compartiments plante" dans le temps, elles constituent un "ensemble cohérent et organisé" et répondent à la définition du système que nous avons donnée dans le glossaire. WEGNER cité par HESSELBACH (1973) différencie quatre stades dans l'analyse des systèmes:

1 - analyse des objectifs,
2 - analyse des compartiments,
3 - analyse des relations,
4 - analyse du comportement des systèmes,

mais si l'on ne veut pas s'en tenir à l'analyse pure et que l'on veuille mettre au point des systèmes ou en créer de façon optimale (ce que nous tenterons de faire dans ce chapitre), il faut ajouter :

5 - l'optimisation des systèmes.

On considére que dans le langage courant, la notion d'analyse des systèmes recouvre, à la limite, l'optimisation, et qu'elle n'est pas menée seulement dans l'intérêt de l'analyse.

Notre objectif, nous le rappelons, est **l'étude de la répartition et du devenir de l'azote dans les différents compartiments du système sol-plante afin d'arriver le plus précisément possible à la quantification des inputs et des outputs d'azote.** Ces résultats sont utilisés pour définir les principes régissant la manipulation des flux d'azote en vue d'augmenter la production céréalière au moindre coût des apports d'engrais azoté, à la condition expresse de maintenir - ou de régénérer s'il le faut - la fertilité du sol.

Les compartiments et leurs relations dans le sytème cultural que nous étudions, sont schématisés à la figure 33, dérivée de la figure 5 par simplification et adaptation au système de culture étudié. Il s'agit en fait d'un système composé de deux sous-systèmes sol-légumineuse et sol-céréale. Ce shéma fait ressortir : les deux sous-systèmes sol-plante (figurés par des octogones) le sol étant commun aux deux, les inputs (figurés par des cercles), les outputs (figurés par des rectangles) et les transferts internes (Nr) constitués des restitutions organiques d'une culture (sous-système) sur l'autre. Ces transferts organiques correspondent à de l'azote qui reste dans le système, dont une partie peut être compostée ou transformée par l'animal.

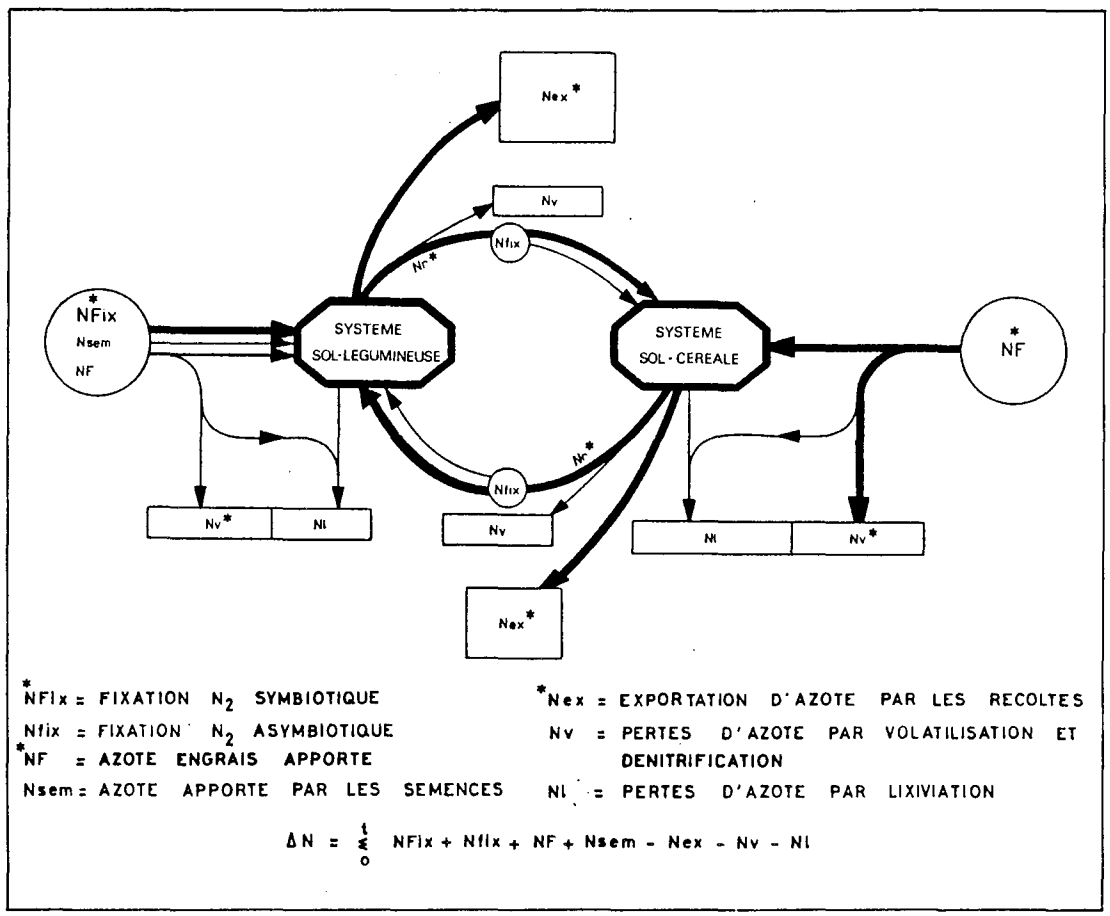


Figure 33 : Schéma montrant les principaux inputs, outputs et transferts azotés dans un système de culture légumineuse-cérale. Les astérisques indiquent les flux pouvant être manipulés.

L'étude réalisée précédemment aux chapitres IV et V met en relief l'importance du sol en tant que source (NdfS) et support (en particulier : aptitude au développement racinaire, teneur en humus stable, valeur de la C.E.C et teneur en phosphore assimilable). Compte tenu de l'objectif défini, et à plus forte raison sans jachère régénératrice, il est impératif d'améliorer, au minimum de maintenir, le pool d'azote mobilisable du sol, afin d'assurer le NdfS. C'est la raison pour laquelle l'établissement de bilans azotés est nécessaire ; ceux-ci, réalisés au sein du système de culture, doivent permettre à court terme de prévoir l'évolution du pool d'azote du sol en se basant sur la somme algébrique

$$\blacktriangle N = {}^{t}\Sigma_{o}\ \text{inputs} + {}^{t}\Sigma_{o}\ \text{outputs}$$

Quel que soit le : ▲ N, on devra toujours chercher à optimiser le système de culture, par manipulation des flux grâce à la connaissance la plus précise possible de leur interaction.

Les modifications des constituants du système: compartiment, flux ou transfert interne ayant un impact significatif sur le solde du bilan azoté, concernent l'augmentation de la fixation symbiotique de N_2 (flux), la diminutions des exportations d'azote (flux et transfert interne), la diminution des pertes d'azote engrais (flux) et l'accroissement du pool d'azote du sol (compartiment et transfert interne). Dans ce chapitre, à partir des résultats obtenus dans les essais au champ et sur modèles expérimentaux, nous allons tenter de montrer comment la manipulation d'un de ces flux d'azote peut interagir avec un ou plusieurs autres flux et ainsi modifier l'organisation de l'ensemble et le solde du bilan que nous désignons par ▲ N.

VI.1 - Principes régissant la manipulation des flux d'azote dans les systèmes de culture

Accroitre la fixation de N_2 (NFix)

L'inoculation par des bradyrhizobiums est obligatoire pour induire une fixation de N_2 (NFix) dans le cas du soja ou peut seulement être envisagée pour l'accroître dans le cas de l'arachide ; elle augmente généralement l'exportation d'azote (Nex). Lorsque NFix est superieur à Nex, la légumineuse contribue à l'enrichissement du pool d'azote du sol. L'inoculation par un champignon mycorhizien associé au bradyrhizobium dans le cas du soja dans les sols où ce premier fait défaut, accroît la fixation de N_2 (% NFix et NFix) et l'exportation d'azote (Nex); le ▲ N est alors accru.

La fumure phosphatée accroît la fixation de N_2 (NFix) et l'exportation d'azote (Nex) mais le % NFix reste inchangé ; le ▲ N est peu modifié. Par contre, l'apport en surface de cet

engrais, en condition d'alimentation hydrique déficitaire, peut entraîner une diminution de la fixation de N_2 (NFix) tout en augmentant l'exportation (Nex) ; le ▲ N est donc réduit. L'incorporation en profondeur de l'engrais phosphatée par un labour en favorisant l'enracinement en profondeur ne peut qu'accroître le ▲ N.

Le fumier, en plus de l'apport d'azote qu'il réalise (Nc) induit un accroissement de la fixation de N_2 (NFix) en relation avec un accroissement des exportations d'azote (Nex). Ceci a été montré sur arachide à Thilmakha (essai XI).

L'introduction d'une céréale dans le système sol-légumineuse induit un accroissement de la fixation de N_2 estimé par le % NFix ; exprimée en kg ha^{-1}, la fixation de N_2 (NFix) varie dans le même sens que l'exportation d'azote (Nex) ; le rapport Nex/NFix semble diminuer en présence d'une céréale. L'intérêt de ce système est d'absorber moins d'azote minéral pour une même quantité de protides formée (céréale et légumineuse).

Diminuer les exportations d'azote (Nex)

La diminution des exportations d'azote peut résulter d'une diminution des rendements où, à rendement égal, d'une augmentation des restitutions au sol. C'est la deuxième cause que nous envisageons. Ainsi, est posé le problème à la fois de l'enfouissement des pailles directement ou aprés transformation par l'animal (fumier) ou par compostage, et de l'indice de rendement fonction de la variété et des techniques. Pour contribuer à accroître le ▲ N, nous avons vu que dans le cas des légumineuses, le % NFix doit être superieur à l'indice de rendement.

Diminuer les pertes d'azote (Nv)

Les pertes pouvant être réduites sensiblement sont celles provenant de l'engrais et dues à la volatilisation. La localisation de l'engrais dans le sol les diminue considérablement (Nv) et augmente l'exportation d'azote (Nex). La restitution des pailles, en réduisant Nex, contribue à accroître le ▲ N sous l'effet de l'engrais azoté. Par exemple, nous montrons sur maïs que la localisation de l'engrais permet d'accroître sensiblement la part de l'engrais allant au pool d'azote du sol via les pailles restituées.

Accroître les restitutions organiques (Nr)

Ces restitutions comprennent la biomasse racinaire et les résidus de récolte constitués essentiellement les pailles. Il ne s'agit pas d'input ou d'output d'azote tels que nous

les avons définis, mais d'un transfert interne d'une culture sur l'autre, qui cependant peut engendrer la fixation libre de N_2 (input Nfix) et la dénitrification (output Nv). Les transferts se font à travers le pool d'azote du sol sens large ; leur importance est donc capitale dans l'alimentation azotée de la céréale (NdfS). C'est grâce à ces transferts (Nr) que l'input N_2 fixé (NFix) peut profiter à la culture suivante (voir figure 24 page 155). Nous avons montré l'effet positif de la fertilisation azotée, de l'amendement organique par des pailles préhumifiées (fumier ou compost) associé à la fertilisation azotée, et du chaulage, sur le pool d'azote mobilisable du sol représenté par la valeur A. Nous considérons donc que ces techniques, de par les restitutions organiques qu'elles induisent (Nr), accroissent indirectement l'exportation d'azote par la céréale (Nex).

Ainsi dans le système arachide-mil à Thilmakha (essai XI), nous montrons que le chaulage accroît la fixation de N_2 (NFix), et l'exportation d'azote (Nex) de l'arachide (effet direct) et de la céréale (effet indirect).

Malgré cette optimisation, si le ▲ N est toujours négatif, le recours à l'engrais azoté (NF) est indispensable.

Enfin, il importe de noter qu'un bilan équilibré n'est pas une condition suffisante de rendements élevés car il peut équivaloir à une production faible ; un niveau minimum d'input azotés est nécessaire pour attendre un objectif de rendement donné.

En application, nous étudierons successivement trois sytèmes de culture, chacun adapté à une zone écologique, en précisant : (a) le bilan ▲ N actuel avec les conséquences sur l'évolution de la fertilité du sol, (b) les voies d'optimisation (ou d'intensification) possibles.

VI.2. Applications des principes définis ci-dessus à trois systèmes de culture

VI.2.1. - Le sytème de culture mil-arachide à Thilmakha en zone sub-sahélienne

On considère en premier le système cultural traditionnel en sol dégradé ne recevant que l'engrais minéral N P K (tableau 29a) et ensuite le système cultural amélioré en sol régénéré (tableau 29b), recevant l'engrais minéral N P K et l'amendement organique.

Dans les deux systèmes, la totalité des parties aériennes est exportée. Cependant, si une très faible partie retourne au sol par les défoliations dans le système traditionnel, on peut considérer que dans le système amélioré, l'ensemble des pailles est restitué au sol, via

Tableau 29 : Bilan de l'azote sur deux années à Thilmakha dans un système mil-arachide année de référence pour l'arachide et le mil : 1983)

a - Système cultural traditionnel en sol dégradé actuellement pratiqué

INPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)			OUTPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)		
- Engrais (NF)	33		- Exportations (Nex)		
- Fixation symbiotique de N_2 (NFix)			. arachide	16	
. dans les parties aériennes	11		. mil	22	
. dans la biomasse racinaire	6	estimée (1)			
- Fixation asymbiotique et libre de N_2 (Nfix)	2	estimées (2)	- Lixiviation sous mil et arachide (Nl)	18	estimés par différence (4) et (5)
- Précipitations (Np)	1	estimées (3)	- Pertes par dénitrification et volatilisation (Nv)		
- Semences	3				
$\left\{ \begin{matrix} t \\ o \end{matrix} \right.$	56		$\left\{ \begin{matrix} t \\ o \end{matrix} \right.$	56	

b - Système cultural amélioré actuellement pratiqué

INPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)			OUTPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)		
- Engrais (NF)	33		- Exportations (Nex)		
- Fumier (Nc)	60		. arachide	85	
			. mil	55	
- Fixation symbiotique de N_2 (NFix)			- Lixiviation (Nl) sous		
. dans les parties aériennes	63		. arachide	15	estimée (4)
. dans la biomasse racinaire	28	estimée (1)	. mil	traces	
- Fixation asymbiotique et libre de N_2 (Nfix)	7	estimée (2)	- Pertes (Nv) par dénitrification et volatilisation à partir :	40	estimées (5) par différence
- Précipitations (Np)	1	estimées (3)	. de l'azote du sol des résidus végétaux + fumier		
- Semences	3		. des engrais azotés		
$\left\{ \begin{matrix} t \\ o \end{matrix} \right.$	195		$\left\{ \begin{matrix} t \\ o \end{matrix} \right.$	195	

Pour le calcul des estimations (1) (2) (3) (4) et (5) voir tableau 37 A annexe.

L'output Nex pour le mil est celui mesuré sur le mil de la série II ayant reçu la fumure ternaire 14-7-7 à raison de 150 kg ha^{-1}.

Pour la signification des symboles NF, Nc, NFix, Nfix, Np, Nex, Nl, voir la figure 5 et les équations 3 et page 50 .

l'animal, étant donné que c'est l'apport de fumier qui a engendré la régénération.

Les deux systèmes sont supposés proches de leur niveau d'équilibre ; cette hypothèse permet l'application de l'équation 10 page 52 pour calculer les outputs inconnus (Nl + Nv), évalués respectivement à 15 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} et 47 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} ; ces pertes, sans les exportations, représentent 32 % et 33 % des inputs d'azote.

Les inputs d'azote du système traditionnel sont d'environ 55 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} et ceux du système amélioré en sol régénéré d'environ 195 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} soit 3,5 fois plus. Il est donc intéressant de noter que le seul input d'azote dû au fumier (Nc) de 60 kg N ha^{-1} accroît les ressources en azote de + 140 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} grâce au processus de régénération induit. Cette régénération a été analysée dans le chapitre V.

Dans ce système, la régénération a necessité un apport organique exogène, donc un transfert de fertilité. A l'équilibre, nous constatons que cet apport équivaut à l'azote total des pailles d'arachide exportées. **Nous pouvons donc faire l'hypothèse que le système régénéré peut fonctionner à son niveau actuel, sans apports organiques exogènes, grâce aux restitutions des pailles d'arachide et de mil via l'animal.**

VI.2.2. - Le système de culture mil-arachide à Bambey en zone soudanienne nord

On considère d'abord le système de culture actuellement pratiqué dit "amélioré" (tableau 30a) recevant une fumure azotée, renforcée par rapport au système de culture de Thilmakha examiné précédemment, ensuite ce même système de culture qu'on cherche à intensifier en appliquant certaines techniques d'optimisation de l'azote qui ont été décrites précédemment (tableau 30b).

Ces techniques sont l'inoculation retardée de l'arachide et l'apport de compost sur le mil ; en ce qui concerne cet apport de compost nous estimons qu'il équivaut à la restitution de l'ensemble des pailles produites par le système après transformation par les animaux (au tableau 30b l'input azote compost n'est pas compté mais également, pour cette raison, n'est pas compté l'output azote paille). Contrairement au système amélioré de Thilmakha en sol régénéré, il s'agit ici de **la simulation** d'une intensification possible dont on examine les conséquences sur le bilan de l'azote.

Le bilan de l'azote donne un ▲ N négatif de - 26 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} pour le système actuellement pratiqué et un ▲ N positif de + 58 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} pour le système intensifié possible. Le déficit du premier est relativement faible (- 13 kg N ha^{-1} an^{-1}) mais il présente l'inconvénient de ne procurer aucune réserve azotée en cas de baisse des inputs d'azote, telle

Tableau 30 : Bilan de l'azote sur deux années à Bambey dans un système mil-arachide (année de référence pour le mil et l'arachide : 1975).

a - Système cultural actuellement pratiqué

INPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)			OUTPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)		
- Engrais			- Exportations		
.mil	90		. arachide	103	
.arachide	15		. mil	66	
- Fixation symbiotique de N_2			- Lixiviation N-sol		
. dans les parties aériennes	68		. sous arachide	25	estimée (4)
. dans la biomasse racinaire	30	estimée (1)	. sous mil	traces	
- Fixation asymbiotique et libre de N_2	7	estimée (2)	- Pertes N engrais		(6)
			. sous mil		
			28 % < pertes < 36 %	29	
			. sous arachide	2	
- Précipitations	1	estimées(3)	- Pertes par dénitrification et volatilisation à partir :		
- Semences	3		. du sol . des résidus végétaux	15	estimée (5)
$\lessgtr^{t}_{o}$	214		$\lessgtr^{t}_{o}$	240	

b - Système cultural intensifié possible

INPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)			OUTPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)		
- Engrais			- Exportations		
. mil	90		. arachide (gousses)	75	
. arachide	15		. mil (grains)	33	
- Fixation symbiotique de N_2			- Lixiviation N-sol		
. dans les parties aériennes	84		. sous arachide	25	estimée (4)
. dans la biomasse racinaire	38	estimée (1)	. sous mil	traces	
- Fixation asymbiotique et libre de N_2	7	estimée (2)	- Pertes N-engrais		
			. sous mil		
			22 % < pertes < 33 %	28	
			. sous arachide	2	
- Précipitations	1	estimées(3)	- Pertes par dénitrification et volatilisation à partir :		
- Semences	3		. du sol . des résidus végétaux	17	estimée (5)
$\lessgtr^{t}_{o}$	238		$\lessgtr^{t}_{o}$	180	

Pour le calcul des estimations (1) (2) (3) (4) (5) et (6) voir tableau 37 A en annexe.

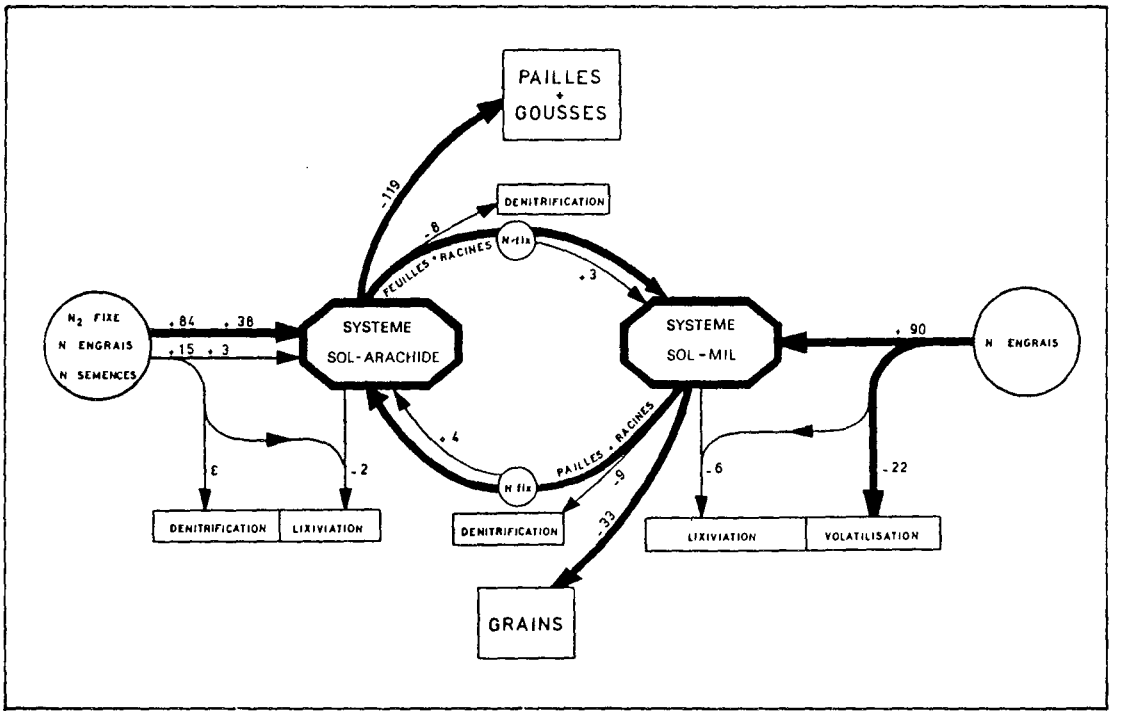


Figure 34 : Schéma montrant les principaux inputs, outputs et transferts azotés dans un système cultural arachide-mil amélioré à Bambey. Essais I et XIII en 1975.

qu'une inhibition de la fixation de N_2 due à la sécheresse, alors que le système intensifié offre une sécurité en permettant un placement (au sens financier du terme) de + 29 kg ha^{-1} an^{-1} d'azote dans le sol.

On peut proposer deux variantes du système intensifié :

- dans un système de culture ou la totalité de la production arachidière serait vendue et seule les pailles de mil restituées au sol (sous forme de compost), le bilan donnerait cette fois-ci : ▲ N = 238 - (180 + 44) = + 14 kg de N ha^{-1} 2 ans^{-1}. Il est équilibré mais n'offre plus la réserve de sécurité en azote signalée précédemment. Ce système est illustré à la figure 34 page 220 ;

- il est vraisemblable qu'une technique de fertilisation azotée à l'instar de celle réalisée sur maïs (non étudiée *in situ* dans le système mil-sol "dior"), permettrait de réduire les pertes d'azote engrais. Faisant cette hypothèse, en se référant d'une part à nos études sur la volatilisation de l'ammoniac en sol "dior" (paragraphe IV.2.4 page 120) et d'autres part à nos études sur le placement d'urée sous maïs à Séfa (paragraphe IV.3.4 page 142), nous pouvons estimer à 15 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} l'économie possible ; elle équivaudrait alors à l'input d'azote procuré par l'inoculation de l'arachide et pourrait donc la remplacer avantageusement étant plus à la portée de l'agriculteur ; mais elle pourrait aussi s'y ajouter au plus grand bénéfice de l'agriculteur.

VI.2.3 - Le système de culture maïs-soja à Séfa en zone sub-guinéenne

On considère d'abord le système de culture actuellement pratiqué tel qu'il est recommandé aux services de vulgarisation (tableau 31a) et ensuite ce même système de culture qu'on cherche à intensifier en appliquant certaines techniques d'optimisation de l'azote analysée précédemment (tableau 31b). Ces techniques sont la double inoculation par des rhizobiums et champignons mycorhiziens (VAM), la restitution des pailles de maïs, et à la localisation en profondeur de l'urée apportée sur maïs. Comme pour le système de culture précédent (paragraphe VI.2), il s'agit ici de **la simulation** d'une intensification possible dont on examine les conséquences sur le bilan d'azote.

Le bilan de l'azote donne un ▲ N négatif de - 46 kg ha^{-1} 2 ans^{-1} pour le système actuellement pratiqué et un bilan équilibré (▲ N = 0) pour le système intensifié possible. Le déficit du premier, relativement important de - 23 kg N ha^{-1} par an, implique sa non validité.

Tableau 31 : Bilan de l'azote sur deux années à Séfa dans un système maïs-soja (année de référence : maïs 1983, soja 1982)

a - Système cultural actuellement poratiqué

INPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)			OUTPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)		
- Engrais			- Exportations		
. maïs	100		. soja (grains)	134	
. soja	20		. maïs	82	
- Fixation symbiotique de N_2			- Lixiviation N-sol		
. dans les parties aériennes	109		. sous soja	10 estimée	(4)
. dans la biomasse racinaire	15 estimée	(1)	. sous maïs	10 estimée	(4)
- Fixation asymbiotique et libre de N_2	7 estimée	(2)	- Pertes N-engrais		(6)
			. sous maïs 17 % < pertes < 30 %	24	
			. sous soja	3	
- Précipitations	2 estimées	(3)	- Pertes par dénitrification et volatilisation à partir :		
- Semences	3		. du sol . des résidus végétaux	39 estimées	(5)
$\sum_{0}^{t}$	256		$\sum_{0}^{t}$	302	

b - Système cultural intensifié possible

INPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)			OUTPUTS (kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$)		
- Engrais			- Exportations		
. maïs	100		. soja (grains)	155	
. soja	20		. maïs (grains)	63	
- Fixation symbiotique de N_2			- Lixiviation N-sol		
. dans les parties aériennes	139		. sous soja	10 estimée	(4)
. dans la biomasse racinaire	20 estimée	(1)	. sous maïs	10 estimée	(4)
- Fixation asymbiotique et libre de N_2	7 estimée	(2)	- Pertes N-engrais		(6)
			. sous maïs 1 % < pertes < 15 %	8	
			. sous soja	3	
- Précipitations	2 estimées	(3)	- Pertes par dénitrification et volatilisation à partir :		
- Semences	3		. du sol . des résidus végétaux	42 estimées	(5)
$\sum_{0}^{t}$	291		$\sum_{0}^{t}$	291	

En revanche, l'équilibre du second suggère sa validité mais en sachant que celle-ci est liée à une forte fixation de N_2 que seule la double inoculation *Bradyrhizobium japonicum* x *Glomus mosseae* rend possible.

Dans le premier système, le bilan de l'azote devrait s'équilibrer selon le procesus suivant :

$$N < 0 \Longrightarrow \searrow \text{Pool N sol} \Longrightarrow \searrow \text{N total plante} \Longrightarrow \searrow \text{Nex céréale}$$

De ce fait, aux modifications près entrainées sur les autres termes du bilan, le bilan s'équilibrera et le pool d'azote du sol se restabilisera.

Le deuxième système (intensifié possible) devrait se maintenir sous l'action des techniques culturales proposées.

Dans le sens d'une simplification des techniques appliquées et d'une amélioration du bilan de l'azote, une variante de ce système peur être proposée :

- **simplification** : on peut penser que dans un sol à potentiel d'infection mycorhizienne plus élevé (rappelons que nous avons choisi le terrain pour son faible potentiel d'infection mycorhizienne), la simple inoculation par bradyrhizobium suffirait, ayant l'avantage d'être plus facile à réaliser. Mais la difficulté est de reconnaître les terrains faiblement pourvus en champignons mycorhiziens et d'en évaluer l'importance relative.

- **amélioration** : l'équilibre du bilan ($\blacktriangle N = 0$) qui ne peut induire de réserve en azote dans le sol, recommande d'accroître l'input d'azote, à plus forte raison si la double inoculation ne peut être pratiquée (et si tel était le cas, en terrain à faible potentiel, le déficit passerait alors de 0 à - 11 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1}). Deux voies pour cela : apporter un engrais **compatible** sur soja (accroître par exemple la dose de compost ou de fumier déjà apportée et correspondant à la restitution des pailles) et/ou accroître la dose d'urée apportée sur maïs jusqu'à la dose optimale. C'est à ce prix qu'on pourra assurer la validité du système de culture maïs-soja hautement productif, avec une réserve de sécurité en azote (en cas de stress hydrique sur soja par exemple).

VI.3 - Conclusion du chapitre VI

La validité des bilans ainsi réalisés est d'abord fonction de leur précision. A la question de leur précision, déjà évoquée au paragraphe II.2 page 52, nous répondons en

rappelant les conditions dans lesquelles ont été calculés les inputs et outputs d'azote et les limites méthodologiques. Ces bilans sont obtenus compte tenu des trois conditions suivantes: (a) pour un itinéraire technique donné, (b) pour une zone écologique donnée en topographie plane, (c) sous une pluviométrie donnée. De ces conditions dépendent étroitement : les exportations (Nex), les inputs N_2 fixé (NFix) et les pertes azote engrais, calculés, donc, avec une relative précision. Pour les autres termes du bilan, on a vu l'imprécision qui affecte les valeurs quantifiées de fixation libre de N_2 (Nfix) et de dénitrification à partir de l'azote sol (valeurs dont nous avons tenté l'estimation au tableau 37 A en annexe page 306).

Nous avons en particulier montré **l'obligation de restituer au sol l'équivalent azote des pailles exportées, sous forme de fumier ou de compost.** Cette conclusion n'est pas nouvelle. En 1973, JONES à Samaru au Nord Nigéria, dans une zone écologique proche de celle de Séfa (sub-guinéenne), après vingt années d'essais longue durée comparant trois techniques de régénération - ou de maintien - du taux de matière organique des sols : le mulch, le fumier et la jachère, prévoyant la réduction - voire la disparition - des jachères au profit d'une agriculture permanente, concluait à la nécessité de restituer au sol tous les résidus de récolte. Plus tard en 1978, WETSELAAR à Khaterine en Australie, en zone écologique comparable (semi-aride), étudiant quatre légumineuses, montrait clairement que la non restitution des parties aériennes directement ou via les animaux (fumier) entraînait une baisse du taux d'azote du sol avec la culture. Enfin, dans une synthèse récente relative aux bilans minéraux des systèmes de culture pluviale en zone aride et semi-aride, PIERI (1985), montre que le maintien de la fertilité des sols passe par le contrôle de leur statut organique et minéral lequel, en système amélioré et culture continue, exige l'enfouissement de matière organique pré-humifiée (PICHOT *et al.* 1981).

Les espoirs fondés sur la restitution des pailles transformées apparaissent actuellement très fragiles. En particulier, la valeur marchande acquise par la paille d'arachide, en raison de sa valeur fourragère, en zone soudano-sahélienne, incite les agriculteurs à la vendre.

Face à cette tendance "néfaste" pour l'avenir de l'agriculture, une double recommandation est à formuler : d'une part **développer les cultures fourragères près ou au sein des systèmes d'élevage** afin de diminuer la demande, d'autre part, **mettre en oeuvre simultanément en milieu rural une propagande active en faveur des légumineuses et vulgariser les méthodes incitatives de valorisation des pailles** afin que cesse leur exportation au-delà de l'exploitation.

Nous avons enfin montré **la nécessité de recommander un système de culture avec un ▲ N positif** afin de pouvoir créer une réserve azotée dans le sol et satisfaire ainsi

une des exigences premières de l'agriculture (d'une agriculture dont les agriculteurs sont des producteurs et non des spéculateurs) résumée par DELOYE et REBOUR (1958) : "En agriculture, l'irrégularité des conditions météorologiques engendre de très bonnes comme de trés mauvaises années. L'agriculteur doit profiter des premières pour reconstituer la provision alimentaire du sol. Le meilleur placement, le meilleur coffre-fort, c'est encore la terre. Tout ce qui lui est confié en vue de sa conservation, de son amélioration physique ou chimique, se retrouve pour aider à "tenir" au cours des mauvaises périodes".

CONCLUSION GENERALE

La nécessaire augmentation de la production alimentaire céréalière de la zone tropicale sèche impose **la mise en oeuvre d'une stratégie d'économie de l'azote.** Depuis vingt ans, des recherches ont été conduites dans le laboratoire de Biochimie des sols du C.N.R.A. de Bambey (Sénégal) pour baser cette stratégie sur la connaissance des bilans de l'azote dans les systèmes de culture du **Sénégal, pays très représentatif de cette zone tropicale sèche.**

Les différents éléments de ces bilans ont été quantifiés de manière précise grâce **aux techniques de marquage isotopique.**

Les coefficients réels d'utilisation de l'engrais azoté (pourcentage de l'engrais azoté consommé par les parties aériennes de la plante) sont en moyenne de 25 % pour le mil et 35 % pour le maïs. Cet engrais a surtout pour effet de mobiliser **l'azote du sol qui constitue 50 % et 70 % de l'azote total absorbé (NdfS) respectivement par le maïs et le mil fertilisés.** Un pourcentage de 30 à 50 % de l'azote engrais est immobilisé (NiS) dans le sol et susceptible d'être récupéré par les cultures suivantes. La part de l'azote absorbée provenant de l'engrais (NdfF) est donc sensiblement plus élevée dans le cas du maïs que dans celui du mil.

Pour économiser l'azote, une première approche consiste à **réduire les pertes de l'azote engrais**, qui peuvent atteindre 40 % de l'apport. L'essentiel de ces pertes est attribuable à la volatilisation, lorsque l'azote est apporté en surface. La technique de localisation de l'engrais permet de les réduire très sensiblement, ou même de les annuler, et d'accroître sensiblement le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté.

Ainsi, la conclusion majeure de ces études de bilan est que, même en présence d'engrais, **la source principale de l'alimentation azotée des céréales**, dans cette zone tropicale sèche, est **le pool d'azote mobilisable du sol** qui est représenté par la valeur A. Ce pool constitue, dans les sols de cette zone, un volant de sécurité essentiel au maintien des réserves en azote assimilables du sol, que certain agronomes désignent sous le terme de **"pouvoir alimentaire azoté"**.

Une stratégie efficace pour économiser l'azote est fondée sur l'emploi de techniques visant à maintenir ce pool à un niveau suffisant.

Grâce à l'azote 15, nous avons testé l'efficacité réelle des techniques recommandées pour maintenir le niveau de ce pool. Alors que la paille de céréale enfouie n'accroît pas la valeur A, les apports de **matière organique transformée (fumier, compost) contribuent à maintenir le niveau de ce pool**. Ce sont des techniques efficaces, mais difficiles à appliquer dans un contexte agricole où l'association agriculture-élevage reste marginale.

En définitive, la légumineuse fixatrice de N_2, en rotation avec la céréale, peut être la meilleure solution pour alimenter ce pool par sa biomasse racinaire, ses pailles restituées directement (soja) ou indirectement par l'intermédiaire des animaux (arachide). Toutefois, en ce qui concerne ce dernier point, on est confronté aux difficultés d'une valorisation des fumiers (voir ci-dessus).

La quantification de la fixation de N_2 par la technique de marquage, appliquée à l'arachide et au soja, permet de mesurer l'effet des principaux facteurs qui la contrôlent. Nous avons identifié en outre les voies d'amélioration de cette fixation de N_2 :

- choix variétal judicieux (le pourcentage de N_2 fixé varie chez le soja de 73 à 81 % selon la variété) ;
- optimisation de l'alimentation en eau, car le pourcentage de N_2 fixé (NdfFix %) tombe de 75 à 30 % sous l'effet de la sécheresse et ceci peut être aggravé par des apports d'engrais en surface ;
- fertilisation phosphatée, dans ces sols souvent carencés en phosphore ;
- inoculation, lorsque le rhizobium spécifique fait défaut, comme c'est le cas pour le soja ;
- inoculation par des champignons mycorhiziens si le sol en est dépourvu ;
- contrôle de l'azote minéral dans le sol, qui inhibe la fixation de N_2 ; cette inhibition peut être réduite en pratiquant les cultures associées céréale-légumineuse. Toutefois, en ce qui concerne ce dernier point, on peut prévoir que par sélection on obtiendra des variétés de légumineuses dont **la fixation de N_2 ne sera pas inhibée par l'azote minéral ;**
- amendement organique par le fumier ou le compost (l'input net N_2 fixé est évalué à 25 kg ha^{-1} pour chaque apport de fumier estimé à 60 kg N ha^{-1} en moyenne) ;
- amendement calcique par la chaux (l'input net N_2 fixé est évalué pour chaque apport de chaux à 20 kg N ha^{-1}).

La connaissance de l'ensemble de ces éléments a permis de quantifier les flux d'entrée et de sortie au niveau de plusieurs systèmes de culture, à partir desquels il est possible de définir une stratégie d'économie de l'azote.

Il se confirme ainsi que, dans la zone tropicale sèche et pour les systèmes de culture considérés, **la légumineuse,** outre sa contribution à la production oléagineuse (ou protéagineuse) et fourragère, est **la clé du maintien du bilan azoté des sols cultivés.**

S'il est bien connu que l'engrais azoté est un facteur essentiel de la production céréalière, **son efficience dépend du maintien du pool d'azote mobilisable à un niveau suffisant dans le sol.**

Nous montrons, dans le cadre des résultats ici présentés, que ce maintien est parfaitement possible pour des systèmes céréale-légumineuse, sans utilisation massive d'engrais azoté.

Mais il faut bien être conscient du fait que cette conclusion n'est valable qu'avec des systèmes **de type semi-intensif**, permettant des rendements moyens de l'ordre de une à deux tonnes de grain pour la céréale, et de gousse pour la légumineuse. En effet :

- l'exportation d'azote par la légumineuse doit être inférieure à la fixation de N_2, afin d'entretenir le pool du sol, et ceci n'est compatible qu'avec un certain plafonnement des rendements,
- les apports d'azote engrais au sol ainsi que toute technique visant à accroître l'azote minéral et minéralisable sous légumineuse doivent être réduits de façon à ne pas limiter la fixation de N_2 aussi longtemps que l'on ne disposera pas de variétés de légumineuses capables de fixer activement N_2 en présence d'azote minéral (voir ci-dessus).

B I B L I O G R A P H I E

Un certain nombre de rapports ou notes ronéotypés repérés ci-dessous par un astérisque, en raison de leur intérêt et dans un souci d'information supplémentaire, ont été cités en dépit de leur non publication.

ADAM G.J., BRIGAUD F., CHARREAU C. et FAUCK R., 1965 - Connaissance du Sénégal : climat - sol - végétation. Etude Sénégalaises N°9 : CRDS, St. Louis du Sénégal, 3, 65 - 109.

AIEA, 1983 - A guide to the use of nitrogen 15 and radioisotopes in studies of plant nutrition: calculations and interpretation of data. A technical document issued by the International Atomic Energy Agency, Vienna, IAEA-TECDOC-288, 63 p.

ALLARD J.L., BERTHEAU Y., DREVON J.J., SEZE O. et GANRY F., 1982 - Ressources en résidus de récolte et potentialités pour le biogaz au Sénégal. Agron. Trop, 38, 213-221.

BALANDREAU J. et DUCERF P., 1978 - Activité nitrogenasique (C_2H_2) *in situ* : Mesure, analyse des facteurs limitants, comparaison de systèmes fixateurs d'azote. *In* : Isotopes in Biological Dinitrogen Fixation. IAEA. (ed.), Vienna, pp. 173-189.

BATIONO A., MUGHOGHO S.K., and MOKWUNYE U., 1986 - Agronomic evaluation of phosphate fertilizers in tropical Africa. *In* : Management of nitrogen and phosphorus fertilizers in sub-saharan Africa. A.U. MOKWUNYE and P.L.G. VLEK (eds.), Martinus Nijhoff, Dordrecht, pp. 283-318.

BINET P. et BRUNNEL J-P., 1968 - Physiologie végétale II. Collection "Biologie" A. OBRE . Paris, Doin, p. 679.

BIRCH H.F., 1958 - The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and Soil, 10, 1-31.

BLONDEL D., 1967 (a) - Importance réelle des pertes par volatilisation de l'ammoniaque en sol sableux (dior). *In* : Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. IRAT (ed.), Tananarive 10-25 Nov. 1967, Tome I. pp. 500-504.

BLONDEL D., 1967 (b) - Premiers résultats sur la dynamique de l'azote minéral de deux sols du Sénégal. *In* : Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. IRAT (ed.), Tananarive 10-25 Nov. 1967, Tome I, pp. 490-499.

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, 589-595.

BLONDEL D., 1971 (a) - Contribution à l'étude de lessivage de l'azote en sol sableux (dior) au Sénégal. Agron. Trop., 26, 687-696.

BLONDEL D., 1971 (b) - Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote - minéral:
en sol sableux au Sénégal. Agron. Trop., 26, 1303-1333.
en sol ferrugineux tropical à Séfa. Agron. Trop., 26, 1334-1353.
en sol ferrugineux tropical à Nioro du Rip. Agron. Trop., 26, 1354-1361.

BLONDEL D., 1971 (c) - Rôle de la plante dans l'orientation de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux. Agron. Trop., 26, 1362-1371.

BLONDEL D., 1971 (d) - Rôle de la matière organique libre dans la minéralisation en sol sableux, relation avec l'alimentation azotée du mil. Agron. Trop., 26, 1372-1377.

BLONDEL D., 1971 (e) - Contribution à l'étude de la croissance - matière sèche et de l'alimentation azotée des céréales de culture sèche au Sénégal. Agron.Trop.,26,707-720

BOUFFIL F., 1950 - Réflexions sur les terres d'Afrique soudanienne dites épuisées. Les possibilités de les améliorer. Rôle primordial de l'humus. Bulletin Agronomique, Annales du C.R.A de Bambey au Sénégal, 6, 41-45.

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, pp. 9-11.

BOUHOT P.S., 1968 - Le rabougrissement de l'arachide. Agron. Trop., 23, 1226-1227.

BOUYER S., 1951 - Microbiologie des sols à arachide du Sénégal - Vue d'ensemble. Bulletin agronomique, Annales du C.R.A de Bambey au Sénégal, 7, 162-166.

BREMNER J.M., 1965 - Organic form of nitrogen. *In* : Methods of soils analysis. C.A. Black (ed.), Amer. Soc. Agronomy, Madison, pp. 1238-1255.

BURTON J.W., BRIN C.A. and RAWLINGS J.O., 1983 - Perfomance of non-nodulating soybean isolines in mixed culture with nodulating cultivars. Dep. Crop Science, North Carolina State Univ., Raleigh, Crop Science, 23, 469-473.

CHABALIER P.F., 1976 - Contribution à la connaissance du développement de l'azote du sol et de l'azote de l'engrais dans un système sol-plante. Thèse de docteur ingénieur, faculté des sciences d'Abidjan, 131 p. + annexes.

CHALK P.M., 1985 - Estimation of N_2 fixation by isotope dilution : an appraisal of techniques involving ^{15}N enrichment and their application. Soil Biol. Biochem., 17, 389-410.

CHARREAU C., 1972 - Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. Agron. Trop., 27, 905-929.

*CHARREAU C., 1974 - Soils of Tropical Dry et Dry-Wet climatic Areas of West Africa and their Use and Management - A series of lectures at the Departement of Agronomy Cornell University, Agronomy Miméo 74-26, Ithaca N.Y. 14853, 434 p.

CHARREAU C. et NICOU R., 1971 - L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. Bulletin Agronomique N°23, IRAT, Paris, 254 p.

CHARREAU C. et TOURTE R., 1967 - Le rôle des facteurs biologiques dans l'amélioration du profil cultural dans les systèmes d'agriculture traditionnel de zone tropicale sèche. *In* : Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. IRAT (ed.), Tananarive, 19-25 Nov. 1967, CFS/TAN/II.2.2.2, pp. 1518-1529.

*CHOPART J.L., 1975 - Influence du labour et de la localisation de l'engrais en profondeur sur l'adaptation à la sécheresse de différentes cultures pluviales au Sénégal, Bambey, ISRA-CNRA, 172 p.

CHOPART J.L., 1980 - Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide-mil-sorgho-riz pluvial). Thèse de doctorat, productions végétales et qualité des produits, Institut national polytechnique de Toulouse, 160 p. et annexes.

*CHOPART J.L., 1984 - Développement racinaire de quelques cultures annuelles cultivées en Afrique de l'Ouest et résistance à la sécheresse. Note technique N°4. IDESSA-GERDAT, Bouaké (Côte d'Ivoire), 6 p.

*CHOPART J.L. et NICOU R., 1987 - Vingt années de culture continue avec et sans labour en sec dans un sol sableux dunaire au Sénégal. Montpellier, IRAT, 36 p.

CISSE L., 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, Institut National polytechnique de Lorraine, Nancy, 184 p.

CISSE L. et VACHAUD G., 1987 - Une méthode simplifiée d'estimation *in situ* de l'extraction de l'eau par les racines. Agron. Trop., 42, 241-247.

CISSE L. 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, 315-326.

COALE E.J., MEISINGER J.J. and WIEBOLD W.J., 1985 - Effects of plant breeding and selection on yields and nitrogen fixation in soybeans under two soil nitrogen regimes. Plant and Soil, 86, 357-367.

CORTIER B., POCTHIER G. et IMBERNON J., 1988 - Le maïs au Sénégal : effet des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. Agron. Trop., 43, 85-90.

DAGNELIE P., 1973, 1975 - Théorie et méthodes statistiques. Vol. 1 et vol. 2, Gembloux, Presses Agronomiques, 378 p et 463 p.

DANCETTE C. 1974 - Les besoins en eau des plantes en grande culture au Sénégal. *In* : Isotope and radiation technique in soil physics and irrigation Studies. C.R. Symp. IAEA/FAO 1973. AIEA (ed.), pp. 351-371.

DANCETTE C., 1976 - Mesures d'évaporation potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Agron. Trop., 31, 321-338.

DANCETTE C. and HALL A.E., 1979 - Agroclimatology applied to water management in the Sudanian and Sahelian zones of Africa. *In* : Agriculture in semi-arid environment. Berlin, Springer Verlag, pp. 98-118.

DANCETTE C. et POULAIN J.F., 1968 - Influence de *l'Acacia albida* sur les facteurs pédoclimatiques et les rendements des cultures. Sols Africains, XIII, 197-239.

DART P.J., 1974 - The infection process. *In* : The biology of nitrogen fixation. A. Quispel (ed.), Amsterdam, North-Holland Publishing Company, pp. 381-429,

DART P.J. and WILDON D.C., 1970 - Nodulation and nitogen fixation by *Vigna sinensis* and *Vicia atropurpurea* : the influence of concentration, form and site of application of combined nitrogen. Australian journal of Agricultural Research, 21, 45-55.

DECAU J., 1978 - Contribution à l'étude de l'influence des conditions de milieu sur la répartition de l'azote dans le sol. Principales formes d'azote obtenues par hydrolyse. Ann. Agron., 19, 653-83.

DELOYE M. et REBOUR H., 1958 - Conservation des sols. 3ème ed., Paris, La Maison Rustique, 167 p.

DIEM H.G., JUNG G., MUGNIER J., GANRY F. et DOMMERGUES Y.R., 1981 - Alginate entrapped *Glomus mosseae* for crop inoculation. *In* : Proc. 5 th Nacom. University Laval, Quebec, p 23.

DOUKA C.E., NYCHAS A.E. and XENOULIS A.C., 1986 - Nitrogen fixation in soybeans as influenced by cultivar and rhizobium strain differences - Biol. Fert. Soils, 2, 113-118.

DIXON R.O.D., 1969 - Rhizobia with particular reference to relationships with host plants. Ann. Rev. Microbiol., 23, 137-158.

*DOMMERGUES Y., 1972 - Problèmes actuels de microbiologie et de biochimie soulevés par la mise en valeur des sols sénégalais. Compte-rendu de la mission effectué au CNRA de Bambey du 6 au 12 Février 1972 - IRAT/CNRA Bambey (Sénégal), 30 p. + annexes.

DOMMERGUES Y.R., 1977 - La Biologie des sols. Paris, Presses Universitaires de France, 126 p.

DOMMERGUES Y.R., 1982 - Scarcely explored means of increasing the soil N pool through biological N_2 fixation. *In* : Whither soil research. Proc 12th Intern Congress Soil Science, New Delhi, pp. 138-149.

DOMMERGUES Y. et MANGENOT F., 1970 - Ecologie microbienne du sol. Paris, Masson, 795 p.

DREVON J.J., 1981 - A deficiency of the symbiotic nitrogen fixation in a dry tropical agrosystem. The nitrogen chlorosis of groundnut (*Arachis hypogea*) in Senegal. *In* : Nitrogen cycling in West Africa ecosystem. T. Rosswall (ed.). Proc. of a workshop held at IITA Ibadan Nigeria 11-15 Dec., Stockholm, SCOPE-UNEP, pp. 209-213.

DROUINEAU G., LEFEVRE G. et BLANC-AICARD D., 1953 - Minéralisation de l'azote organique au cours de la saison sèche sous climat méditerranéen. C.R. Acad. Sci., 238, 424-426.

*DUCERF P., 1978 - Synthèse des travaux effectués sur la modélisation de la fixation d'azote d'une culture d'arachide au Sénégal. Années 1976-1977. ISRA-CNRA Bambey, Sénégal. 43 p.

FARIS M.A. and TA T.C., 1985 - Study of nitrogen transfert from alfalfa to associated timothy under field conditions. *In* : Proc. XV International Grassland Congress, August 24-31, 1985, Kyoto, Japan, pp. 448-449.

FAURIE G., 1980 - Devenir de l'ammonium en sol calcaire : nitrification et volatilisation de l'ammoniac. Thèse de doctorat d'Etat ès-science soutenu le 28 mars 1980, Université de Lyon I, N° d'ordre 80-14.

FELLER C. et GANRY F., 1982 - Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. III. Effet du compostage et de l'enfouissement de divers résidus de récolte sur la répartition de la matière organique dans différents compartiments d'un sol sableux. Agron. Trop., 37, 262-269.

FELLER C., GANRY F. et CHEVAL M., 1981 - Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. I. Influence d'une fertilisation azotée (urée) et d'un amendement organique (compost) sur la répartition du carbone et de l'azote dans différents compartiments d'un sol sableux. II. Décomposition de résidus végétaux (compost) pendant une saison des pluies dans un sol sableux. Agron. Trop., 36, 9-25.

FEHR W.R., CAVINESS C.E., BURMOOD D.T. and PENNINGTON J.S., 1971 - Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. Crop Science, 11, 929-930.

FREIRE J.R., 1977 - Inoculation of soybean. *In* : Exploiting legume rhizobium symbiosis in tropical agriculture. J.M. VINCENT, A.S. WHITNEY and J. BOSE (eds.), Proc. of a workshop, August 1976, University of Hawaii, Niftal Project.

FLAIG W., 1970 - Produits organiques de synthèse comme source d'azote pour les plantes. C.R. Acad. Agri. Fr., 10, 690-702.

FRENEY J.R., SIMPSON J.R. and DENMEAD O.T., 1981 - Ammonia volatilization. *In* : Terrestrial Nitrogen Cycles. Processes, Ecosystems Strategies and Management Impacts. F.E. Clark and I. Rosswall (eds.), Ecol. Bull. (Stockholm), 33, pp. 291-302.

FRIED M. and BROESHART H., 1975 - An independent measurement of the amount of nitrogen fixed by a legume crop. Plant and Soil, 43, 707-711.

FRIED M. and DEAN L.A., 1952 - A concept concerning the measurement of available soil nutrients. Soil Sci., 73, 263-271.

FRIED M. and MIDDELBOE V., 1977 - Measurement of amount of nitrogen fixed by a legume crop. Plant and Soil, 47, 713-715.

FRIED M., DANSO S.K.A. and ZAPATA F., 1983 - The methodology of measurement of N_2 fixation by non-legumes as inferred from field experiments with legumes. Canad. J. Microbiol., 29, 1053-1062.

GANRY F., 1973 - Le problème de la date de semis du mil *Pennisetum typhoides* en zone tropicale. African Soils, OUA/STRC, 17, 59-63.

GANRY F., 1974 - Utilisation des engrais marqués dans la fertilisation des légumineuses. Recherche d'une meilleure efficacité de l'engrais et d'une meilleure efficience de la fixation. Agron. Trop., 29, 833-836.

GANRY F., 1977 - Etude en microlysimètres de la décomposition de plusieurs types de résidus de récolte dans un sol sableux tropical. Agron. Trop., 32, 51-65.

GANRY F., 1980 - The importance of cultural methods to increase the quantity of nitrogen (N_2) fixed by a groundnut crop in the Sudano Sahelian zone of Senegal. *In* : Organic recycling in Africa, colloquium FAO-SIDA, Buea (Cameroon), 5-14 December 1977. Rome, FAO, pp. 168-175 (Soil Bulletin N°43).

*GANRY F., 1984 - Importance des enfouissements de matière organique dans l'amélioration des systèmes culturaux au Sénégal. Cours National de Formation : Aménagement des sols et recyclage organique. F.A.O., Yaoundé (Cameroun), Nov. 1983, 40 p.

*GANRY F., 1984 - Application de la méthode isotopique à l'étude quantitative de la fixation de N_2 dans les principaux agrosystèmes en zone tropicale sèche (légumineuses, céréales, arbres, compost). Séminaire FAO/AIEA sur l'utilisation des isotopes dans les études de la fixation biologique de l'azote, Ankara, 12-16 nov. 1984, 51 p.

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. AIEA-SM. 235/16, International Atomic Energy Agency (ed.), Vienna, pp. 313-331

*GANRY F. et NDIAYE M., 1977 - Action de l'inoculation et action de l'épandage foliaire d'une solution nitritive (N-P-K-S) sur la fixation symbiotique et le rendement de l'arachide. Coordinated Research on the use of isotopes in fertilizer efficiency studies on grain legumes. Research contract N° RC/1296-SEN of the joint FAO/IAEA Division. *In* : Report presented at workshop held in Vienna in dec. 1977, 16 p.

*GANRY F. et SARR P.L., 1983 - Valorisation du recyclage organique dans un objectif d'économie des engrais et de maintien de la fertilité des sols au Sénégal. Collection : Etudes Techniques du CNRA (Bambey - Sénégal), Doc. N° 100/83, 20 p.

*GANRY F. et WEY J., 1975. - Cordinated Research Program on the use of isotope in studies on Biological Dinitrogen Fixation. Research contract N° RC/1296 - SEN of the joint FAO/IAEA Division. *In* : Report presented at workshop held in Vienna. "Action de l'inoculation et de la fumure azotée sur le rendement et la fixation symbiotique de l'arachide". ISRA/AIEA, 20 p.

*GANRY F. et WEY J., 1981 - Coordinated Research Program on the use of isotope in studies on Biological Dinitrogen Fixation. Research contract N° D1-SEN 2375 of the joint FAO/IAEA Division. *In* : Report presented at workshop held in Vienna. "Action de l'inoculation et de la fumure azotée sur le rendement et la fixation symbiotique de cinq variétés de soja". ISRA/AIEA, 21 p.

GANRY F., DIEM H.G. and DOMMERGUES Y.R., 1982 - Effect of inoculation with *Glomus mosseae* on nitrogen fixation by field grown soybean. Plant and Soil, 68, 421-329.

GANRY F., GUIRAUD G. and DOMMERGUES Y.R., 1978 - Effect of straw incorporation on the yield and nitrogen balance in the sandy soil pearl millet cropping system of Senegal. Plant and Soil, 50, 647-662.

GANRY F., ROGER P. et DOMMERGUES Y.R., 1978 - A propos de l'enfouissement de pailles dans les sols sableux tropicaux du Sénégal. C.R. Acad. Agri. Fr., 15 mars 1978, 445-454.

GANRY F., WEY J., DIEM H.G. and DOMMERGUES Y.R., 1985 - Inoculation with *Glomus mosseae* improves N_2 fixation by field-grown soybeans. Biology and Fertility of soils, 1, 15-23.

GAUDIN R., DUPUY J. et BOURNAT P., 1987 - Suivi du contenu en azote de la solution du sol d'une rizière aprés placement d'urée. Agron. Trop., 42, 13-19.

GIANINAZZI-PEARSON V. and DIEM H.G., 1982 - Endomycorrhizae in the tropics. *In* : Microbiology of tropical soils and plant productivity. Y.R. DOMMERGUES, H.G. DIEM (eds.), Martinus Nijhoff and W. Junk, The Hague, pp. 209-251.

GIBSON A.H., 1962 - Genetic variation in the effectiveness of nodulation of lucerne varieties. Austral. J. Agro. Res., 13, 388-399.

GIBSON A.H., DREYFUS B.L. and DOMMERGUES Y.R., 1982 - Nitrogen fixation by legumes in the tropics. *In* : Microbiology of tropical soils and productivity, DOMMERGUES Y.R. and DIEM H.G. (ed.), Martinus Njihoff and W. Junk, The Hague, pp. 37-73.

GIGOU J., 1982 - Dynamique de l'azote minéral en sol nu ou cultivé de région tropicale sèche du Nord-Cameroun - Thèse de docteur ingenieur, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 130 p. et annexes.

GOLDSWORTHY and HEATCHCOTE, 1964 - Fertilizer trials with soybeans in nothern Nigeria. Emp. Exp. Agric., 32, 257-262.

*GRAULLE J.B., 1950 - Notes sur la régénération et la conservation de la fertilité des sols du Sénégal. Programme proposé aprés étude du rapport de la Direction du Plan, Chambre de Commerce de Dakar, 12 p.

GREENLAND D.J., 1977 - Contribution of microorganisms to the nitrogen status of tropical soils. *In* : Biological Nitrogen Fixation in Farming Systems of the Tropics. A.N. AYANABA and P.J. DART (eds.), John Wiley and Sons, New-York, pp. 13-25.

GROS A., 1974 - Engrais - Guide pratique de la fertilisation. Paris, La Maison Rustique, 413 p.

GUIRAUD G., 1984 - Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Thèse d'Etat, Université P. et M. Curie, Paris VI, 335 p.

GUIRAUD G., GANRY F. et LLIMOUS Giselle, 1980 - Etude au moyen de ^{15}N de l'influence de l'enfouissement répété de compost de paille de mil sur la disponibilité de l'azote d'un sol sableux tropical. Agron. Trop., 35, 215-219.

GUIRAUD G., GANRY F., et LLIMOUS Giselle, 1980 - Action de différents résidus de récolte en sol sableux tropical. Estimation au moyen de ^{15}N. Agron. Trop., 35, 220-224.

HEAL O.W., 1979 - Consequences of non-assimilation of nitrogen by plants. *In* : Nitrogen Assimilation of Plants. E.J. Hewitt and C.V. Cutting. (eds.), Academic press, London, pp. 625-636.

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.

HARDY R.W.F., HOLSTEN R.D., JACKSON E.K. and BURNS R.C., 1968 - The acetylene reduction assay for N_2 fixation : laboratory and field evaluation. Plant physiol., 43, 1185-1207.

HEBERT J., 1971 - Théorie de la fumure azotée - Cycle supérieur d'agronomie à l'I.N.A., l'azote en agriculture, 104-119.

HENIN S. et DUPUIS M., 1945 - Essai de bilan de la matière organique du sol - Ann. Agron., 1, 16-27.

HENZELL E.F. and VALLIS I., 1977 - Transfert of nitrogen between legumes and other crops. *In* : Biological Nitrogen Fixation in Farming Systems of the Tropics. A.N. Ayanaba and P.J. Dart (eds.), John Wiley and Sons, New York, pp. 73-88.

HERRIDGE D.F., 1987 - A whole-system approch to quantifying biological nitrogen fixation by legumes and associated gains and losses of nitrogen in agricultural systems. N.S.W. Department of Agriculture. Agricultural Research Center R.M.B. 944, Tamworth, N.S.W., Australia, 2340. Doc. multigraphié, 25 p.

HESSELBACH J., 1973 - Systemanalyse und ihr Instrumentarium für alle. Ber. Ldw., 51, 124-133.

IMBERNON J., 1981 Variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du Sénégal. Application au calcul d'un bilan sous-culture. Doctorat 3ème cycle, Université scientifique et médicale et I.N.P. de Grenoble, soutenu le 27 Avril 1981, 152 p.

IRAT-INFORMATION, 1980 - L'enracinement du soja au Sénégal. Les besoins en eau du soja, au sud du Sénégal. IRAT (ed.), N°13, Montpellier.

JACQUIN F. and VONG P.C., 1989 - Incorporation of a nitrogen fertilizer in the humified compounds of a typic hapludalf. The science of the Total Environment, 81/82, 465-469.

JARA P., 1981 - Le Continuum *Rhizobium japonicum* - *Rhizobium cowpea*. Thèse de spécialité, Université d'Aix - Marseille I, Marseille, 149 p.

JENNY H., 1941. Factors of soils formation. A system of quantitative pedology. Mc Graw - Hill Book Company, New York, 281 p.

JONES M.J., 1971 - The maintenance of soil organic matter under continnous cultivation at Samaru, Nigeria. J. agri. Sci., Camb., 77, 473-482.

JONES M.J., 1973 - The organic matter content of the Savanna Soils of West Africa. J. of Soil Sc., 21, 42-53.

JONES M.J., 1975 - Leaching of nitrate under maize at Samaru, Nigeria. Trop. Agri. (Trinidad), 52 (1).

JONES M.J. and BROMFIELD A.R., 1970 - Nitrogen in the rainfall at Samaru, Nigeria. Nature (London), 227 (86).

JUNG G., 1969 - Cycles géochimiques dans un écosystème de région tropicale sèche : sol ferrugineux tropical peu lessivé (dior). Oecol. Plant., 4, 195-210.

LAGACHERIE B., HUGOT R. et AMARGER Noelle, 1977 - Sélection de souches de *Rhizobium japonicum* d'après leur compétitivité pour l'infection. Ann. Agron., 28, 379-389.

*LARCHER J., WEY J., et GANRY F., 1984 - Recherches sur le soja 1978-1983. Doc. D.R.P.V/ISRA-CNRA de Bambey, 18-19.

LARCHER J., 1988 - Le soja en régions tropicales - Une synthèse des recherches de l'IRAT - Mémoires et Travaux de l'IRAT, 15, 186 p.

LIN C.J., 1983 - Studies of the relationship between the nitrogen fixing activity of rhizobium and the yield of different soybean cultivars. Journal of Agricultural Research of China. 32, 253-258.

MAIGNIEN R., 1965 - Notice explicative. Carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000, ORSTOM, Dakar, 63 p. + 1 carte.

Ministère du développement Rural (M.D.R), 1987 - Communication en Conseil Interministériel, Séance du 30 Avril 1987, M.D.R., 289 p.

MOREL R., 1989 - Les sols cultivés. Tec. Doc., Paris, 380 p.

MYERS R.J.K. and PAUL E.A., 1971 - Plant uptake and immobilisation of ^{15}N labelled ammonium nitrate in a field experiment with wheat : *In* : Nitrogen-15 in Soil Plant Studies, IAEA (ed.), Vienne, pp. 55-64.

MUSTIN M., 1987 - Le Compost Gestion de la matière organique. Paris, Dubusc, 950 p.

NICOU R., 1978 - Etude de sucessions culturales au Sénégal - Résultats et Méthodes - Agron. Trop., 23, 51-61.

NUTMAN P.S., 1965 - The relation between nodule bacteria and the legume host in the rhizosphère and in the process of infection. *In* : Ecology of soil-Borne Plant Pathogens. University of California Press, Berkeley, pp. 231-247.

OBATON M. 1974 - Légumineuses tropicales : problèmes posés par la symbiose fixatrice d'azote et l'inoculation des semences. Agron. Trop., 29, 1128-1139.

*OLIVER R. et WEY J., 1983 - Hétérogénéité au niveau d'un champ. Cas d'une culture de soja en moyenne Casamance. Collection Etudes et Techniques du CNRA - Document N° 83/112, ISRA - CNRA, Bambey, Sénégal, 20 p.

OLLIVIER B., BERTHEAU Y., DIEM H.G. et GIANINAZZI-PEARSON V., 1983 - Influence de la variété de *Vigna unguiculata* C. Walp dans l'expression de trois associations endomycorhiziennes à vésicules et arbuscules. Can. J. Bot., 61, 354-358.

PANKHURST C.E. and SPRENT J.U., 1975 - Effects of water stress on the respiratory and nitrogen-fixing activity of soybean root nodules. J. Exp. Bot., 26, 287-304.

PATE J.S. and DART P.J., 1961 - Nodulation studies in legumes. IV. The influence of inoculum strain and time of application of ammonium nitrate on symbiotic response. Plant and Soil, 15, 329-46.

PICHOT J., 1975 - Fumure azotée des cultures vivrières tropicales et rôle de la matière organique dans la fertilité des sols. *In* : Les recherches en agronomie à l'IRAT de 1969 à 1974. Agron. Trop., 30, 163-175.

PICHOT J., SEDOGO M.P., POULAIN J.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, 122-133.

PIERI CH., 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, 339-368.

*PIERI CH., 1979 - La fertilisation potassique du mil *Pennisetum* et ses effets sur la fertilité d'un sol sableux du Sénégal. Compte-rendu de cinq années d'expérimentation. Doc. Ronéo, IRAT/Montpellier, 72 p.

PIERI CH., 1979 - Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal, à l'aide de capteurs en céramique poreuse. Agron. Trop., 34, 9-22.

*PIERI CH., 1982 - Estimation du bilan des pertes moyennes en eau et en éléments minéraux dans une sucession culturale mil-arachide (années 1979 à 1981). Montpellier IRAT-AIEA, 26 p.

PIERI CH., 1989 - Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au Sud du Sahara. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT. Paris, La Documentation française, 444 p.

RENNIE R.J., DUBETZ S., BOLE J.B. and MUENDEL H.H., 1982 - Dinitrogen fixation measured by ^{15}N isotope dilution in two Canadian soybean cultivars. Agron. J., 74, 725-730.

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 Bambey, Sénégal, 63-78.

SAINT-MACARY H., BEUNARD P. et PICHOT J., 1981 - Nodulation et fixation d'azote de cinq variétés de soja en culture sur brouillard. Agron. Trop., 34, 42-53.

SARR P.L., 1981 - Analyse des effets induits par l'intensifications des cultures sur quelques caractérisriques physico - chimiques d'un sol ferrugineux tropical du Sénégal (Nioro - du - Rip). Doctorat 3ème cycle, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 100 p.

SAUERBECK D.R., NONNEN S. and ALLARD J.L., 1982 - Consumption and turnover of photosyntates in the rhizosphere depending on plant species and growth conditions. *In* : Abstracts 12th International Congress of Soil science, New Delhi, India, 8-16 février 1982, p. 59.

SEBILLOTE M., 1974 - Agronomie et Agriculture - Essai d'analyse des tâches de l'agronome. Cah. ORSTOM, Série Biol., 24, 3-25.

SEBILLOTE M., 1979 - Itinéraire techniques et évolution de la pensée agronomique. C.R. Acad. Agri. Fr., 64, 906-914.

SIBAND P., 1972 - Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance. Principaux résultats. Agron. Trop., 27, 574-591.

SIBAND P., 1974 - Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. Agron. Trop., 29, 1228-1248.

SIBAND P., 1981 - Croissance, nutrition et production du mil - Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. Thèse Doctorat d'Etat es-science, Université de Montpellier, France, 302 p.

SIBAND P. et GANRY F., 1976 - Application de l'analyse d'extraits de tissus conducteurs à l'étude de l'effet d'un compost sur une culture de mil. (*Pennisetum typhoides*). Proc. of 4th International Colloquium on the control of plant nutrition, Gent (Belgique). Rijksuniversiteit (ed.), Belgique, vol. 1.

SCORAILLE (de) G., 1987 - Courbes de réponse à la fumure azotée et méthode du bilan : approches complémentaires. C.R. Acad. Agr. Fr., 73, 11-21.

*SOCHTIG H., 1978 - Application Agricole des Radioisotopes. Rapport au Gouvernement du Sénégal N° 1377. Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), 18 p.

SPRENT J.I., 1972 - The effects of water stress on nitrogen-fixing root nodules. 4. Effects on whole plants of *Vicia faba* and *Glycine max*. New Phytologist, 71, 603-611.

SPRENT J.I., 1975 - Nitrogen fixation by legumes subjected to water and light stresses. *In* : Symbiotic nitrogen fixation in plants. P.S. Nutman (ed.), Cambridge University Press, New York, pp. 405-420.

STREET H.E., ELLIOT H.E. and FOWLER M.W., 1978 - The physiology of roots. *In* : Interactions between pathogenic soil micro-organiqmes and plants. Y.R. DOMMERGUES and S.V. KRUPA (eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 69-114.

SUBBA RAO N.S., 1976 - Field response of legumes in India to inoculation and fertilizer applications. *In* : Symbiotic nitrogen fixation in plants. P.S. Nutman (ed.), Cambridge University Press, London, pp. 255-268.

TOURTE R., 1965 - Suggestion pour une politique d'application de la recherche agronomique dans les pays en voie de développement. Agron. Trop., 11, 1163-1176.

TOURTE R., 1971 - Thèmes légers, thèmes lourds, systèmes intensifs : voies différentes ouvertes au développement agricole du Sénégal. Agron. Trop., 26, 632-671.

TOURTE R. et BILLAZ R., 1982 - Approche des systèmes agraires et fonction recherche-développement. Contribution à la mise au point d'une démarche. Agron. Trop., 37, 223-232.

*TOURTE R., FAUCHE J. et SCHOCH P.J., 1966 - Vers une évaluation des rendements de l'arachide par la pluviométrie annuelle. Bambey, Sénégal, CNRA-IRAT, 7 p.

VACHAUD G., VAUCLIN M., IMBERNON J., PIERI CH., DANCETTE C. et DIATTA S., 1982 - Etude des pertes en eau et en matières minérales sous culture considérant la variabilité spatiale du sol. *In*: 12th International congress of soil science. New Delhi, India, February 8-16, 13 p. et annexes.

VALLIS I., HAYDOLK K.P., ROSS P.J. and HENZELL E.F., 1967 - Isotopic studies on the uptake of nitrogen by pasture plants. III. The uptake of small addition of ^{15}N labelled fertilizer by Rhodes grass and Townsville lucerne. Aust. J. Agric. Res., 18, 865-877.

VLEK P.L.G and STUMPE J.M., 1978 - Effects of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems. Soils Sci. Soc. Amer. J., 42, 416-421.

WETSELAAR R., 1967 - Estimation of nitrogen fixation by four legumes in dry monsoon area of North Western Australia. Austr. J. Exp. Agric. Anim. Husb., 7, 518-522.

WETSELAAR R., and FARQUHAR G.D., 1980 - Nitrogen losses from tops of plants. Adv. Agron., 33, 263-302.

WETSELAAR R. and GANRY F., 1982 - Nitrogen balance in tropical agrosystems. *In* : Micobiology of tropical soils and plant productivity. Y.R. DOMMERGUES et H.G. DIEM (eds.), MARTINUS Nijhoff and W. Junk., The Hague, pp. 1-35.

*WEY J., 1974 - Inoculation bactérienne des légumineuses au Sénégal. Mémoire ENITA Dijon, France, 47 p.

WEY J., 1983 - (I) Inoculation du soja par le *Rhizobium japonicum*. (II) Production de rhizobium: mise au point d'une méthode simplifiée. Agron. Trop., 38, 308-320.

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, 129-136.

WEY J. et SAINT MACARY H., 1982 - Inoculation du soja par le *Rhizobium japonicum* au sénégal. Détermination de la dose d'inoculum à appliquer au champ. Agron. Trop., 37, 24-29.

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, 258-268.

* voir note en début de page 234.

ANNEXES

. Liste des figures dans le texte

. Liste des figures en annexe

. Tableaux en annexe

. Figures en annexe

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géographique du Sénégal précisant l'implantation des essais, des isohyètes (1930 à 1960) et de la zone de culture du soja et du maïs.

Figure 2 : Isohyètes correspondant à la période 1968-1987 pour Bambey, Nioro et Séfa et 1972-1987 pour Thilmakha. Pluviométrie atteinte ou dépassée à la probabilité de 50 %. Isothermes annuelles et principaux climats d'aprés ADAMS et al (1965).

Figure 3 : Pluviométrie pouvant être atteinte ou dépassée à la probabilité de 20, 50 et 80 %. Stations de Thilmakha et de Bambey. D'aprés DIAGNE et VANDERSCHMIDT, (non publié).

Figure 4 : Pluviométrie pouvant être atteinte ou dépassée à la probabilité de 20, 50 et 80 %. Stations de Nioro et de Séfa. D'aprés DIAGNE et VANDERSCHMIDT, non publié).

Figure 5 : Schéma exprimant les deux méthodes de dosage de l'azote 15. D'aprés GUIRAUD (1984).

Figure 6 : Schéma exprimant les deux principaux pools d'azote sol et plante, avec leurs inputs, outputs et transfert d'azote. D'aprés WETSELAAR et GANRY (1982).

Figure 7 : Schéma d'interprétation du bilan de l'engrais azoté dans le système sol-plante.

Figure 8 : Réponse du mil exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote. A : sans compost ; B : avec compost. Essai au champ I.

Figure 9 : Réponse du maïs exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote. A : urée en surface ; B : urée en bande. Essai au champ V.

Figure 10 : Réponse du maïs exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote. A : urée en surface ; B : urée en bande ; C : urée en poquet. Essai au champ VII.

Figure 11 : Réponse du maïs exprimée en kg grain (M.S) ha^{-1}, à l'application de doses croissantes d'azote - Essai au champ VII.

Figure 12 : a (haut) : variation des NdfF au cours du temps ;
b (bas) : variation de N total et de NdfF au cours du temps.
A : sans compost ; B : avec compost.
90 N et 30 N : doses d'azote engrais apportées.
Essai au champ I.

Figure 13 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol sous culture de mil. Urée apportée à 30 N et à 90 N sans compost (A) et avec compost (B). Bambey, essai au champ I.

Figure 14 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée à 100 kg N ha^{-1}. Séfa, essai au champ V.

Figure 15 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Séfa, essai au champ IV.

Figure 16 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Séfa, essai au champ VI.

Figure 17 : Histogramme des coefficients réels d'utilisation de l'azote engrais (CRU %) d'une culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

Figure 18 : Histogramme des quantités d'azote engrais immobilisé dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

Figure 19 : Histogramme des pertes d'azote engrais hors du sol cultivé en maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

Figure 20 : Profil d'immobilisation de l'azote engrais dans le sol (NiS %) sous culture de maïs. Dose d'urée apportée 100 kg N ha^{-1}. Nioro, essai au champ IV.

Figure 21 : Schéma du système utilisé en milieu contrôlé pour la détermination des pertes par volatilisation d'ammoniac à partir de l'urée ajoutée.

Figure 22 : Volatilisation ammoniacale de l'urée en fonction de la dose appliquée - Essais en milieu contrôlé.

Figure 23 : Valeur de NdfS du mil sous l'action du compost et de l'urée. Bambey, essai au champ I.

Figure 24 : Schéma exprimant le transfert d'azote de la culture de légumineuse à la culture suivante. (d'aprés HENZELL et VALLIS 1977)

Figure 25 : Influence de la fumure azotée sur le N total, NdfS, NdfF et NdfFix d'une culture d'arachide. Bambey, essai IX.

Figure 26 : Origine de l'azote absorbé par une culture d'arachide. Bambey, essai IX.

Figure 27 : Absorption relative d'azote 15 par la légumineuse cultivée avec le mil. Bambey, essai lysimétre X.

Figure 28 : Schéma d'interprétation des effets de la chaux et du fumier sur la régénération de la fertilité azotée du sol. Thilmakha, essai au champ XI.

Figure 29 : Schéma d'interprétation des effets de la fumure phosphatée en surface ou de la non fumure phosphatée (l'une évaluée par rapport à l'autre), sur l'efficacité symbiotique d'un soja affecté ou non par une sécheresse post-floraison. Séfa, essais au champ XII et XIV.

Figure 30 : Relation entre NdfFix de l'arachide (kg N ha^{-1}) et la pluviométrie (mm an^{-1}) (en trait interrompu variation concomitante de N total.
A3 : traitements 2, 3, 5, 6, 7 et 8, essai au champ XIII
A2 : traitements 4, 7 et 11, essai au champ IX
A1 : GANRY et WEY (1977).

Figure 31 : Evolution en cours de cycle du soja, de N total et de NdfFix exprimés en kg N ha^{-1} en présence ou absence de la fumure phosphatée. R1, R5 et R8 : stades reproductifs - Séfa, essai au champ XII.

Figure 32 : Variation du % NdfFix, du % NdfS et du % NdfF chez le soja, l'arachide sous l'action de différents facteurs : hydrique (soja et arachide) ;inoculation par une souche Bradyrhizobium japonicum + Glomus mosseae (soja) ; fumure azotée starter (arachide). Le diamètre des cercles est proportionnel au N total des plantes. Les numéros (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) et (8) correspondent aux essais au champ suivants : N° XII, XII, IX, XIII, XIII, IX et IX; le numéro (4) correspond à la référence (GANRY et al. 1982).

Figure 33 : Schéma exprimant les principaux inputs, outputs et transferts azotés dans un système cultural légumineuse-cérale.

Figure 34 : Schéma exprimant les principaux inputs, outputs et transferts azotés dans un système cultural arachide-mil amélioré à Bambey. Essais I et XIII en 1975.

LISTE DES FIGURES EN ANNEXE

Figure 1 A : Pluviométrie de Bambey en 1975 et cycle végétatif du mil. Pluie cumulée tous les trois jours. Pt = prélèvement de plantes ; N1, N2 et N3 = apport urée marqué avec 15N sur mil. Essai au champ I.

Figure 2 A : Pluviométrie de Bambey en 1977 et cycle végétatif du mil. Pluie cumulée tous les trois jours. N2 et N3 = apport urée marquée avec 15N sur mil. Essai au champ II.

Figure 3 A : Pluviométrie de Bambey en 1980 et cycle végétatif du mil. Pluie cumulée tous les trois jours. Pt = prélèvements de solution du sol. N2 et N3 = apport sulfate marqué avec 15N sur mil. Essai au champ III.

Figure 4 A : Pluviométrie à Nioro en 1978 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N2 et N3 = apport urée marquée avec 15N sur maïs. Essai au champ IV.

Figure 5 A : Pluviométrie à Séfa en 1983 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N1, N2 et N3 = apport urée marquée 15N sur maïs. Essai au champ V.

Figure 6 A : Pluviométrie à Séfa en 1984 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N1, N2 et N3 = apports urée marquée 15N sur maïs. Essai au champ V.

Figure 7 A : Pluviométrie à Séfa en 1985 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N1, N2 et N3 = apports urée marquée avec 15N sur maïs. Essai au champ VII.

Figure 8 A : Pluviométrie de Thilmakha en 1983 et cycle végétatif de l'arachide. Essai au champ IX.

Figure 9 A : Pluviométrie de Bambey en 1974 et cycle végétatif de l'arachide. Essai au champ IX.

Figure 10 A : Pluviométrie de Bambey en 1975 et cycle végétatif de l'arachide. Essai au champ XIII.

Figure 11 A : Pluviométrie de Séfa en 1980 et cycle végétatif du soja. Pluie cumulée tous les trois jours. Essai au champ XII.

Figure 12 A : Pluviométrie de Séfa en 1981 et cycle végétatif du soja. Pluie cumulée tous les trois jours. Essai au champ VIII.

Figure 13 A : Pluviométrie de Séfa en 1982 et cycle végétatif du soja. Pluie cumulée tous les trois jours. Essai au champ XIV.

Figure 14 Aa : Plan d'une parcelle principale. Essai aux champ I.

Figure 14 Ab : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ I.

Figure 15 A : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ II et III.

Figure 16 A : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ IV, V, VI et VII.

Figure 17 Aa : Dispositif de l'essai azote 15 au champ (cinq variétés de soja et deux cultures de référence à deux niveaux d'azote). Essai au champ VIII.

Figure 17 Ab : Plan d'une sous-parcelle azote 15. Essai aux champ VIII.

Figure 17 Ac : Dispositif de l'essai rendement (cinq variétés de soja à trois niveaux d'azote). Essai au champ VIII.

Figure 17 Ad : Plan d'une parcelle de rendement (essai rendement). Essai aux champ VIII.

Figure 18 A : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ IX et XIII.

Figure 19 Aa : Plan des parcelle principale et sous-parcelle azote 15. Essai aux champ XI.

Figure 19 Ab : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai au champ XI.

Figure 20 A : Dispositif expérimental de l'essai au champ XII.

Figure 21 Aa : Plan d'ensemble de l'essai au champ XIV.

Figure 21 Ab : Plan d'une parcelle principale. Essai au champ XIV.

Figure 21 Ac : Plan d'une sous-parcelle. Essai au champ XIV.

Tableau 1A : Analyse statistique de la pluviométrie (d'après DIAGNE et VANDERSCHMIDT, non publié)

STATION : THILMAKHA **PERIODE : 1972-1987**

		PLUIES ATTEINTES OU DEPASSEES EN mm				
Décade		Minimum	8 ans/10	5 ans/10	2 ans/10	Maximum
	1	0	0	0	0	0
Mai	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	4.3	36.7
Juin	2	0	0	0	16.2	37.0
	3	0	0	1.8	25.1	53.0
	1	0	0	11.8	24.4	45.8
Juil.	2	0	0	19.1	39.6	88.0
	3	0	6.2	21.5	49.4	147.0
	1	0	9.8	51.7	90.6	221.0
Août	2	0	3.4	20.9	55.3	83.5
	3	2.0	17.9	47.7	87.9	161.2
	1	0	18.5	38.3	63.2	82.5
Sept.	2	0	6.4	33.8	51.8	100.0
	3	0	1.4	10.1	39.3	149.7
	1	0	0	7.5	20.2	34.0
Oct.	2	0	0	0	10.6	23.5
	3	0	0	0	0	11.0
	1	0	0	0	0	0
Nov	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
ANNEE		206.1	250.2	327.3	436.8	593.7

Tableau 1A : Analyse statistique de la pluviométrie (d'après DIAGNE et VANDERSCHMIDT, non publié)

STATION : BAMBEY **PERIODE : 1968-1987**

Décade		PLUIES ATTEINTES OU DEPASSEES EN mm				
		Minimum	8 ans/10	5 ans/10	2 ans/10	Maximum
Mai	1	0	0	0	0	1.1
	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	1.7
Juin	1	0	0	0	1.3	47.8
	2	0	0	0	8.1	81.5
	3	0	0	0.4	23.1	44.1
Juil.	1	0	0.2	8.1	42.6	67.2
	2	0	1.1	19.1	62.0	89.6
	3	0	18.1	35.6	75.8	98.2
Août	1	0	17.9	38.8	95.3	141.3
	2	0	14.0	48.8	97.1	186.2
	3	7.0	24.0	41.9	102.8	157.4
Sept.	1	9.4	25.7	61.5	120.9	161.8
	2	5.6	17.1	46.2	79.7	177.9
	3	1.8	6.9	20.2	80.4	157.9
Oct.	1	0	0.1	9.4	25.7	35.9
	2	0	0	1.8	18.1	50.8
	3	0	0	0	1.1	54.0
Nov.	1	0	0	0	0	0.8
	2	0	0	0	0	0.6
	3	0	0	0	0	25.1
ANNEE		316.6	378.4	438.5	553.1	695.6

TABLEAU 2A : Analyse statistique de la pluviométrie (d'après DIAGNE et VANDERSCHMIDT, non publié

STATION : NIORO DU RIP **PERIODE : 1968-87**

		PLUIES ATTEINTES OU DEPASSEES EN mm				
Décade		Minimum	8 ans/10	5 ans/10	2 ans/10	Mimimum
	1	0	0	0	0	0
Mai	2	0	0	0	0	10.0
	3	0	0	0	0.9	15.3
	1	0	0	2.0	30.8	76.7
Juin	2	0	0	5.8	33.0	145.5
	3	0	2.2	24.4	34.0	86.3
	1	4.0	10.5	34.7	59.9	78.7
Juil.	2	0	16.8	54.4	101.8	171.3
	3	0.1	22.9	58.5	114.7	167.5
	1	4.5	27.4	66.9	99.1	253.0
Août	2	5.7	20.7	54.8	120.2	171.6
	3	16.2	26.3	73.6	144.5	237.0
	1	7.4	24.2	70.4	119.5	148.1
Sept.	2	9.7	33.6	64.4	118.0	140.7
	3	0	8.4	27.8	70.1	84.9
	1	0	4.6	15.5	41.1	100.0
Oct.	2	0	0.3	12.0	30.9	47.7
	3	0	0	0	0	14.5
	1	0	0	0	0	0
Nov.	2	0	0	0	0	0.4
	3	0	0	0	0	55.0
ANNEE		417.5	516.3	586.3	821.6	1015.8

TABLEAU 2A : Analyse statistique de la pluviométrie (d'après DIAGNE et VANDERSCHMIDT, non publié

STATION : SEFA **PERIODE : 1968-1987**

		PLUIES ATTEINTES OU DEPPASSEES EN mm				
Décade		Minimum	8 ans/10	5 ans/10	2 ans/10	Maximum
	1	0	0	0	0	14.4
Mai	2	0	0	0	1.1	7.1
	3	0	0	2.7	23.4	82.1
	1	0	8.7	18.5	53.6	79.3
Juin	2	0	1.2	20.2	48.7	77.5
	3	0.2	6.8	40.7	60.7	141.5
	1	5.7	26.7	67.1	97.1	166.2
Juil.	2	22.1	39.8	91.0	128.9	226.4
	3	16.6	46.1	92.5	134.6	503.6
	1	4.3	45.6	68.1	129.8	172.0
Août	2	1.8	37.0	83.6	114.4	167.4
	3	18.2	48.5	121.6	176.2	289.0
	1	35.5	41.0	81.2	144.2	188.2
Sept.	2	4.3	44.8	72.9	123.7	151.9
	3	7.0	28.1	57.4	73.0	141.8
	1	0	7.4	29.6	48.9	105.5
Oct.	2	0	6.7	20.9	43.8	76.5
	3	0	0	0	17.7	64.1
	1	0	0	0	3.6	26.8
Nov.	2	0	0	0	0	0.5
	3	0	0	0	0	40.3
ANNEE		648.2	745.7	959.6	1088.7	1484.2

Tableau 3A : Quantité et pourcentage de l'azote 15 de l'engrais marqué absorbé à trois stades végétatifs dans la plante entière - Mil variété. Syn.1. Bambey, essai I

			Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E %	NdfF %	Q ^{15}N g ha^{-1}	CRU %
Démariage	30 N	+	186.7	7.46	0.091	2.8	6.94	3.7
		0	173.2	6.52	0.117	3.6	7.60	4.0
	90 N	+	176.9	7.53	0.267	8.3	20.1	3.5
		0	180.3	6.98	0.375	11.6	26.19	4.6
Montaison	30 N	+	923.0	22.98	0.324	10.1	74.35	13.1
		0	755.6	16.66	0.548	17.1	91.34	16.1
	90 N	+	994.1	29.73	1.059	32.5	314.79	18.5
		0	871.1	25.89	1.133	35.3	293.31	17.2
Epiaison	30 N	+	2195.6	22.53	0.247	7.7	55.66	9.8
		0	1988.1	19.37	0.347	10.8	67.26	11.9
	90 N	+	3200.0	45.77	0.455	14.2	208.11	12.2
		0	2398.5	32.69	0.599	18.7	195.9	11.5

Pour les données concernant l'azote apporté, voir tableau 5 page 79.

Le témoin ON donne, en N total kg ha^{-1}, respectivement avec et sans compost : démariage : 6,2 et 5,1 ; montaison : 17,2 et 7,1 ; épiaison : 19,9 et 8,0.

Chaque valeur est la moyenne de 5 répétitions.

Tableau 4A : Quantité et pourcentage de l'azote 15 de l'engrais marqué absorbé dans les deux principaux organes du mil variété syn. 1 au stade floraison. Bambey, essai I.

			Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E %	NdfF %	Q ^{15}N g ha^{-1}	CRU %
Tiges + feuilles	30 N	+	3073.3	31.28	0.134	4.2	41.76	4.42
		0	2245.9	15.93	0.302	9.4	48.05	5.08
	90 N	+	4055.6	46.77	0.531	16.6	248.53	8.77
		0	3554.1	33.00	0.612	19.1	201.9	7.12
Epis	30 N	+	528.2	7.09	0.632	19.7	44.83	4.74
		0	445.3	6.43	0.693	21.9	44.56	4.72
	90 N	+	916.7	15.94	0.967	30.1	154.22	5.40
		0	911.1	14.78	1.372	42.7	202.79	7.15
Plante entière	30 N	+	3601.5	38.37	0.226	7.0	86.59	9.1
		0	2691.2	22.36	0.414	12.9	92.61	9.80
	90 N	+	4989.9	62.71	0.642	20.0	402.75	14.2
		0	4465.2	47.78	0.847	26.4	404.69	14.3

Pour les données concernant l'azote apporté voir tableau 5 page 79

Le témoin ON donne, en N total kg ha^{-1}, pour la plante entière, respectivement avec et sans compost : 22,5 et 10,1

Chaque valeur est la moyenne de 5 répétitions.

Tableau 5 A : Quantité et pourcentage de l'azote 15 de l'engrais marqué absorbé dans les principaux organes du mil variété syn. 1 au stade de maturité. Bambey, essai I.

			Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E %	NdfF %	Q ^{15}N g ha^{-1}	CRU %
Tiges + feuilles	30 N	+	5548.8	19.91	0.298	9.3	59.29	6.27
		0	3548.0	12.46	0.421	13.1	52.40	5.54
	90 N	+	8895.3	56.43	0.626	19.5	353.52	12.47
		0	6628.9	27.38	0.804	25.1	220.28	7.77
Rachis + glumes	30 N	+	1244.8	10.51	0.387	12.1	40.71	4.31
		0	686.6	6.33	0.574	17.9	36.34	3.85
	90 N	+	1603.0	14.50	0.777	24.2	112.68	3.97
		0	1262.2	11.40	1.170	36.5	133.47	4.71
Grains	30 N	+	1392.0	19.30	0.362	11.3	69.84	7.39
		0	1130.0	14.32	0.645	20.1	92.35	9.77
	90 N	+	2154.0	32.94	0.920	28.7	303.12	10.69
		0	1896.0	27.60	1.200	37.4	331.15	11.68
Plante entière	30 N	+	8185.6	49.70	0.342	10.6	169.84	18.0
		0	5364.6	33.11	0.547	17.0	181.09	19.2
	90 N	+	12652.3	103.87	0.741	23.1	769.32	27.1
		0	9787.1	66.38	1.032	32.1	684.90	24.2

Pour les données concernant l'azote apporté voir tableau 5 page 79 .

Le témoin ON donne, en N total kg ha^{-1}, pour la plante entière, respectivement avec et sans compost : 36,7 et 19,4.

Chaque valeur est la moyenne de 5 répétitions. Les rendements M.S. sont ceux obtenus dans la "parcelle de prélèvement pour rendement M.S. en cours de cycle" (figure 14 Aa en annexe).

Tableau 6A : Quantité et pourcentage de l'azote 15 de l'engrais marqué absorbé dans les quatre principaux organes du maïs. Séfa, essai V, 1983.

Traitement		Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E %	% NdfF	Q ^{15}N g ha^{-1}	CRU %
Grains	Surface	3571.11	50.57	2.52	52.3	1274.28	26.49
	Bande	4308.04	63.10	2.86	59.4	1804.70	37.50
Feuilles + Spathes	Surface	2508.78	22.49	2.87	59.6	645.46	13.41
	Bande	2866.66	27.59	2.97	61.	752.00	15.62
Rachis	Surface	1523.30	6.34	2.40	49.8	152.2	3.16
	Bande	2068.90	8.37	2.71	55.3	229.89	4.77
Tiges	Surface	1007.80	2.89	2.49	51.7	72.00	1.50
	Bande	1284.40	4.01	2.70	56.3	108.44	2.25
Plante entière	Surface	8410.99	82.29	2.60	54.0	2143.9	44.60
	Bande	10528.00	103.07	2.81	58.4	2895.13	60.22

Azote apporté = 100 kg N ha^{-1} sous forme d'urée avec E % = 4.81

Le témoin ON donne 19,12 kg N total ha^{-1} pour la plante entière.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 7A : Quantité et pourcentage de l'azote 15 de l'engrais marqué absorbé dans les quatre principaux organes du maïs, Séfa, essai VI, 1984.

Traitements		Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E %	N dfF %	Q ^{15}N g ha^{-1}	CRU %
Grains	Surface	2870.0	41.81	2.38	47.35	971.33	18.80
	Bande	3508.9	52.32	3.35	66.65	1752.78	34.35
	Poquet	4046.7	64.77	3.15	62.67	2040.11	39.90
Feuilles + Spathes	Surface	2227.8	17.12	2.76	54.91	472.55	9.17
	Bande	2622.2	22.72	3.23	64.27	733.89	14.48
	Poquet	2818.9	26.44	3.09	61.48	817.11	16.01
Tiges	Surface	943.3	3.69	2.60	51.73	95.89	1.85
	Bande	1280.0	6.01	3.07	61.08	184.55	3.63
	Poquet	1480.0	6.43	2.97	59.09	191.11	3.77
Rachis	Surface	964.4	3.33	2.37	47.15	79.00	1.53
	Bande	1080.0	3.87	3.31	65.86	128.00	2.52
	Poquet	1181.1	3.94	3.14	62.47	123.89	2.45
Plante entière	Surface	7005.5	64.95	2.33	46.36	1513.44	31.35
	Bande	8491.1	84.92	3.29	65.46	2793.89	54.98
	Poquet	9415.5	101.59	3.12	62.08	3169.55	62.13

Azote apporté = 100 kg N ha^{-1} sous forme d'urée avec E % = 5.03

Le témoin ON donne 9,61 kg N total ha^{-1}.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 8A : Quantité et pourcentage de l'azote 15 de l'engrais marqué absorbé dans les quatre principaux organes du maïs, Séfa, essai VII, 1985.

Traitements		Poids sec kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	E %	N dff %	Q ^{15}N g ha^{-1}	CRU %
Grains	Surface	2567	34.78	2.47	50.48	860.00	17.14
	Bande	3078	49.22	3.35	68.39	1651.44	32.91
	Poquet	3567	52.55	3.13	65.51	1646.00	34.30
Feuilles + Spathes	Surface	1567	7.67	2.83	57.78	217.11	4.32
	Bande	1667	9.67	3.17	64.72	306.33	6.10
	Poquet	1944	11.33	3.26	68.23	369.22	7.69
Rachis	Surface	911	3.11	2.51	51.20	79.33	1.57
	Bande	989	4.22	3.20	65.35	137.00	2.73
	Poquet	1211	5.22	3.27	68.36	174.55	3.64
Tiges	Surface	1033	2.78	2.58	52.72	71.78	1.43
	Bande	1300	7.78	3.32	67.78	259.55	5.17
	Poquet	1644	7.78	4.44	71.96	221.33	5.09
Plante entière	Surface	6078	48.33	2.53	51.65	1228.22	24.46
	Bande	7033	70.89	3.32	67.78	2354.33	46.91
	Poquet	8367	76.89	3.14	65.71	2411.11	50.72

Azote apporté = 100 kg N ha^{-1} sous forme d'urée avec E % = 4.90.

Le témoin ON donne 6,44 kg N total ha^{-1}.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 9A : Quantité et pourcentage d'azote 15 de l'engrais marqué immobilisé(NiS)dans les différents horizons du sol. Bambey, essai I.

Horizon cm	30 N										90 N									
	Avec compost					Sans compost					Avec compost					Sans compost				
	N ‰	Ntotal kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N ‰	Ntotal kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N ‰	Ntotal kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N ‰	Ntotal kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %
0-20	0.270	811	0.053	431	45.6	0.163	490	0.082	403	42.6	0.297	892	0.101	904	31.9	0.213	640	0.151	968	34.2
20-40	0.169	541	0.019	102	10.8	0.146	426	0.020	95	10.0	0.182	581	0.039	224	7.9	0.147	469	0.035	165	5.8
40-80	0.152	974	0.010	95	10.0	0.113	726	0.010	73	7.7	0.139	891	0.022	196	6.9	0.127	813	0.020	165	5.8
80-120	0.109	696	0.007	52	5.5	0.103	656	0.000	0	0	0.122	783	0.014	107	3.8	0.103	662	0.011	73	2.6
Total 0-120					71.9					60.3					50.5					48.4

Pour les données concernant l'azote apporté voir tableau 5 page 79.

N % du sol en début d'expérience (1971) : 0,021 < N % < 0,024.

Chaque valeur est la moyenne de 5 répétitions.

Tableau 10A : Quantité et pourcentage d'azote 15 de l'engrais marqué immobilisé (NiS) dans les différents horizons du sol sous maïs. Séfa, essai V, 1983.

Horizon cm	En surface					En bande				
	N ‰	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N ‰	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %
0-15	0.270	620	0.157	973	20.2	0.270	619	0.151	936	19.4
15-30	0.270	624	0.035	218	4.5	0.269	617	0.038	234	4.9
30-60	0.255	1170	0.0172	201	4.1	0.255	1170	0.0181	212	4.4
60-90	0.260	1092	0.0129	140	2.9	0.270	1134	0.0108	122	2.5
90-120	0.259	1103	0.0108	119	2.5	0.271	1154	0.0113	130	2.7
120-150	0.250	1050	0.0168	1869	3.5	0.300	1260	0.0168	211	4.4
Total 0-150					37.8					38.3

Azote apporté : voir tableau 6A.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 11A : Quantité et pourcentage d'azote 15 de l'engrais marqué immobilisé (NiS) dans les différents horizons du sol sous maïs. Séfa, essai VI, 1984.

Horizon	Surface					Bande					Poquet				
cm	N ‰	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N ‰	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N ‰	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %
0-15	0.286	656	0.119	783	15.5	0.270	620	0.118	732	18.6	0.282	647	0.125	809	16.7
15-30	0.269	617	0.024	148	2.9	0.234	537	0.0366	196	4.2	0.264	606	0.029	176	3.0
30-60	0.297	1363	0.0136	185	3.8	0.273	1253	0.0141	177	3.7	0.295	1354	0.016	217	4.3
60-90	0.306	1285	0.0166	213	4.2	0.283	1189	0.0157	187	3.7	0.288	1210	0.010	121	2.8
90-120	0.293	1248	0.0134	167	3.3	0.272	1180	0.0120	142	2.8	0.279	1188	0.015	178	3.6
120-150	0.278	1168	0.0095	111	2.2	0.276	1159	0.0101	117	2.5	0.269	1130	0.010	113	2.3
Total 0-150		6337		1607	31.9		5938		1551	35.5		6135	0.026	1614	32.7

Azote apporté : voir tableau 7A.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 12A : Quantité et pourcentage d'azote 15 de l'engrais marqué immobilisé (NiS) dans les différents horizons du sol sous maïs. Séfa, essai VII, 1985.

Horizon cm	Surface					Bande					Poquet				
	(1) N %	(2) Ntotal kg/ha	(3) E %	(4) Q ^{15}N g/ha	(5) NiS	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0-15	0.0247	566.10	0.1132	640.85	12.77	0.0245	563.42	0.1603	903.48	18.00	0.0275	632.31	0.1617	978.11	20.38
15-30	0.0206	473.91	0.0222	105.12	2.09	0.0200	458.61	0.0622	285.44	5.68	0.0268	614.27	0.0780	479.22	9.99
30-60	0.0237	1089.36	0.0175	190.85	3.80	0.0238	1093.18	0.0271	296.77	5.91	0.0246	1122.29	0.0510	597.83	12.46
60-90	0.0244	1025.64	0.0432	443.34	8.43	0.0236	992.18	0.0134	133.46	2.66	0.0300	1054.20	0.0222	234.51	4.89
90-120	0.0279	1187.16	0.0178	210.86	4.20	0.0259	1100.04	0.0101	111.11	2.21	0.0268	1139.71	0.0110	125.49	2.61
120-150	0.0242	1016.40	0.0068	68.94	1.37	0.0254	1066.80	0.0068	72.32	1.44	0.0243	1022.70	0.0069	70.59	1.47
0-150		5358.57		1659.96	32.66		5274.23		1802.58	35.90		5635.48		2485.45	51.80

Azote apporté: voir tableau 8A.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 13A : Quantité et pourcentage de l'azote 15 de l'engrais marqué absorbé dans les différents organes du maïs Nioro, essai IV.

	Grains						Rachis + Spathes						Tiges + feuilles						Total plante						
	Poids sec kg ha^{-1}	Ntotal kg ha^{-1}	E %	NdfF	Q^{15}N g ha^{-1}	CRU %	Poids sec kg ha^{-1}	Ntotal kg ha^{-1}	E %	NdfF	Q^{15}N g ha^{-1}	CRU %	Poids sec kg Hha^{-1}	Ntotal kg ha^{-1}	E %	NdfF	Q^{15}N g ha^{-1}	CRU %	Poids sec kg ha^{-1}	Ntotal kg ha^{-1}	E%	NdfF	Q^{15}N g ha^{-1}	CRU %	Val."A" kg N ha^{-1}
1	3710	52.6	1.84	42	967	21.2	1702	7.1	1.75	40	124	2.7	2807	24.3	1.78	41	434	9.5	8219	84.0	1.81	42	1521	33.4	147
2	4040	59.2	1.75	40	1037	22.8	1635	6.6	1.81	42	129	2.6	2918	22.2	1.71	39	380	8.9	8593	88.0	1.75	40	1540	33.8	155
3	3769	55.9	1.90	44	1062	23.3	1858	7.6	1.78	41	134	2.9	2860	25.0	1.75	40	438	9.6	8487	88.4	1.84	42	1627	35.7	143
4	3919	58.6	2.00	46	1172	25.7	1587	5.3	1.83	42	97	2.1	3024	24.0	1.80	41	426	9.3	8530	87.9	1.93	44	1697	37.2	131
5	3968	57.7	1.81	42	1045	22.8	1788	6.1	1.74	40	107	2.4	2893	21.6	1.65	38	340	7.5	8649	84.7	1.77	41	1498	32.9	152
6	3723	57.3	1.88	43	1080	23.7	1695	6.4	1.75	40	112	2.5	2941	21.0	1.77	41	372	8.2	8359	84.9	1.84	42	1561	34.3	143
7	4105	63.1	1.88	43	1186	26.0	1696	6.7	1.74	40	116	2.5	3137	24.4	1.73	40	422	9.3	8938	94.2	1.83	42	1723	37.8	144
Moyenne																			8539	87.4	1.83	42	1595	35.0	145

Azote apporté = 105 kg ha^{-1} E % = 4,34 sous forme d'urée.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 14A : Quantité et pourcentage d'azote 15 de l'engrais marqué immobilisé (NiS) dans les différents horizons du sol, sous culture de maïs. Nioro, essai IV.

	0-20 cm				20-40 cm				40-80 cm				80-120 cm				0-120 cm
	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS%	Ntotal kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	N total kg ha^{-1}	E %	Q ^{15}N g ha^{-1}	NiS %	NiS %
1	735	0.085	625	13.6	570	0.052	299	6.5	800	0.035	28	6.0	940	0.023	22	4.9	31.0
2	790	0.077	605	13.2	540	0.066	359	7.9	920	0.030	28	6.0	970	0.019	18	3.9	31.0
3	700	0.093	654	14.2	570	0.053	303	6.6	870	0.043	34	7.3	980	0.015	15	3.1	31.2
4	795	0.076	605	13.2	525	0.048	288	6.3	870	0.031	27	6.0	920	0.022	20	4.4	29.9
5	756	0.079	598	13.1	535	0.059	317	6.9	920	0.030	28	6.0	930	0.022	20	4.3	30.3
6	765	0.073	560	11.9	565	0.046	261	5.7	980	0.026	25	5.4	950	0.020	19	4.1	27.1
7	780	0.077	598	13.0	545	0.055	299	5.9	850	0.032	27	4.7	910	0.020	18	3.9	27.5
m				13.2				6.5				5.9				4.1	29.7

Pour les données concernant l'azote apporté voir tableau 13A.

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 15 A : Influence de la variété et de fertilisation azotée sur le rendement M.S et N total du soja au champ. Séfa, essai VIII.

Traitements principaux variétés	Sous-traitements engrais azoté	Grains			Pailles (1)			Grains + Pailles	
	kg ha^{-1}	M.S. kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	N %	M.S. kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	N %	M.S. kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}
44/A/73	0	1708	107.7	6.31	3655	26.6	0.73	5363	134.3
	20	1817	115.7	6.37	4235	30.4	0.72	6052	146.1
	100	1955	133.9	6.85	4251	37.7	0.89	6206	171.6
4/73	0	1122	69.0	6.15	1695	14.1	0.83	2817	83.0
	20	1202	74.1	6.16	1765	14.3	0.81	2967	88.4
	100	1312	86.3	6.58	2541	24.2	0.95	3853	110.5
22/72	0	1650	112.7	6.83	4199	30.3	0.72	5840	143.0
	20	1809	123.4	6.82	4512	33.3	0.74	6321	156.7
	100	1988	139.4	7.01	5147	36.1	0.70	7167	175.5
26/72	0	1593	113.9	7.15	4620	31.8	0.69	6212	145.7
	20	1944	139.0	7.15	4193	28.0	0.67	6137	167.0
	100	1886	141.6	7.51	5190	44.0	0.85	7076	185.6
JUPITER	0	1681	111.6	6.64	3134	20.5	0.65	4816	132.1
	20	1765	119.1	6.75	3817	25.1	0.66	5581	144.2
	100	1757	123.8	7.05	4240	27.5	0.65	5997	151.4
p.p.d.s(2)	entre les traitements principaux à l'intérieur d'un même sous-traitement.	240	17.9		837	9.4		994	23.9
p.p.d.s	entre les sous-traitements à l'intérieur d'un même traitement principal	253	19.0		796	9.3		965	24.8
p.p.d.s	entre moyennes des traitements principaux	173	12.7		748	8.1		861	17.9
p.p.d.s	entre moyennes des s/traitements	113	8.5		356	4.1		432	11.1

(1) pailles = feuilles + tiges + cosses

(2) p.p.d.s à P = 0.05

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions

Azote apporté : voir tableau 16A.

Tableau 16A : Bilan de l'azote dans cinq variétés de soja cultivées au champ à deux niveaux d'azote (20 N et 100 N).
Séfa, essai VIII.

Variété / Engrais azoté N kg ha^{-1}	Organe	Rendement kg M.S. ha^{-1}	N total		Q_{15N}		NdfF		CRU	Valeur A N kg ha^{-1}		NdfFix	
			%	kg ha^{-1}	%	g ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	Sol + fixation	Fixation	%	kg ha^{-1}
44/A/73	Grain	1817	6.37	115.62	0.128	148.36	2.78	3.21	16.05				
20 N	Paille	4233	0.72	30.36	0.192	58.38	4.16	1.26	6.30				
	Total	6050	2.41	145.98	0.142	206.74	3.08	4.47	22.35	629	487	75,6	110,4
100 N	Grain	1954	6.85	133.87	0.118	157.34	11.68	15.63	15.63				
	Paille	4219	0.89	37.68	0.171	64.40	16.93	6.38	6.38				
	Total	6203	2.77	171.56	0.127	218.74	12.57	22.01	22.01	695	600	75,6	129,8
4/73	Grain	1202	6.16	74.06	0.146	107.85	3.16	2.34	11.70				
20 N	Paille	1765	0.81	14.28	0.202	28.84	4.38	0.62	3.10				
	Total	2966	2.98	88.35	0.155	136.70	3.36	2.96	14.80	575	433	73,0	64,5
100 N	Grain	1311	6.58	86.26	0.175	150.85	17.33	14.95	14.95				
	Paille	2539	0.95	24.21	0.222	53.70	21.98	5.32	5.32				
	Total	3851	2.87	110.47	0.185	204.55	18.32	20.27	20.27	446	351	62,6	69,2
22/72	Grain	1808	6.82	123.34	0.104	127.81	2.26	2.78	13.90				
20 N	Paille	4510	0.73	33.28	0.156	51.83	3.38	1.12	5.60				
	Total	6318	2.48	156.63	0.115	179.65	2.49	3.90	19.50	783	641	80,5	126,1
100 N	Grain	1987	7.01	139.29	0.116	11.48	11.48	15.99	15.99				
	Paille	5176	0.70	36.11	0.178	64.24	17.62	6.36	6.36				
	Total	7164	2.45	175.40	0.128	225.47	12.67	22.35	22.35	689	594	75,3	132,3

Azote apporté : 20,2 kg N ha^{-1} $(NH_4)_2 SO_4$ E % = 4.61
100,2 kg N ha^{-1} $(NH_4)_2 SO_4$ E % = 1,01

[illegible] la moyenne de 6 répétitions

Tableau 17A : suite tableau 16A

Variété engrais azoté N kg ha^{-1}	Organe	Rendement kg M.S. ha^{-1}	N total		Q ^{15}N		NdfF		CRU	Valeur A (N kg ha^{-1})		NdfFix	
			%	kg ha^{-1}	%	g ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	Sol + fixation	Fixation	%	kg ha^{-1}
26/72	Grain	1943	7.15	138.94	0.075	103.74	1.63	2.26	11.30				
20 N	Paille	4191	0.67	27.95	0.129	36.19	2.80	0.78	3.90				
	Total	6134	2.72	166.88	0.084	139.93	1.82	3.04	15.20	1079	937	85.6	143.0
100 N	Grain	1885	7.51	141.53	0.111	157.61	10.99	15.55					
	Paille	5188	0.85	43.94	0.166	72.87	16.43	17.22					
	Total	7073	2.62	185.47	0.124	230.49	12.28	22.77	22.77	714	619	75.8	140.8
Jupiter	Grain	1764	6.75	110.04	0.136	161.43	2.95	3.25	16.25				
20 N	Paille	3815	0.66	25.09	0.184	46.29	3.99	1.00	5.00				
	Total	5579	2.58	144.14	0.144	207.72	3.12	4.25	21.25	621	479	74.9	108.1
100 N	Grain	1556	7.05	123.78	0.144	168.95	14.26	17.65	17.65				
	Paille	4238	0.65	27.53	0.175	48.21	17.33	4.77	4.77				
	Total	5794	2.61	151.31	0.143	217.16	14.16	22.42	22.42	606	511	72.2	109.4
Non Nod.	Grain	374	5.23	20.25	0.590	112.87	12.80	2.59	12.95				
20 N	Paille	648	0.78	5.00	0.623	30.68	13.51	0.67	3.35				
	Total	1022	2.47	25.25	0.569	143.62	12.34	3.26	16.30	142	-	-	-
100 N	Grain	815	5.77	46.62	0.519	243.75	51.39	23.96	23.96				
	Paille	1239	0.73	9.00	0.508	44.50	50.30	4.53	4.53				
	Total	2056	2.70	55.62	0.518	288.25	51.29	28.49	28.49	95	-	-	-

Tableau 18A : suite tableaux 16A et 17A.

Variété Engrais azoté N kg ha-1	Organe	Rendement kg M.S. ha-1	N total		Q 15N		NdfF		CRU	Valeur A N kg ha-1		NdfFix	
			%	kg ha-1	%	g ha-1	%	kg ha-1	%	Sol + fixation	Fixation	%	kg ha-1
44/A/73 non inoculé	Grain	1819	6.11	111.25	0.098	114.25	2.13	2.37	11.85				
	Paille	2671	0.65	17.35	0.148	26.25	3.21	0.56	2.80				
20 N	Total	4490		128.60	0.104	140.50	2.28	2.93	14.65	857	715	81	104
44/A/73 non inoculé	Grain	2012	6.12	123.62	0.160	198.87	15.84	19.58	19.58				
	Paille	3121	0.66	20.75	0.213	43.62	21.09	4.38	4.38				
100 N	Total	5133	2.81	144.37	0.167	242.49	16.60	23.96	23.96	502	407	68	98

Tableau 19 A : Influence variétale sur l'origine de l'azote mobilisé dans le soja cultivé à 2 niveaux d'azote engrais. Séfa, essai VIII.

Traitements principaux variétés	Sous-traitements Engrais azoté kg N ha^{-1}	N total kg N ha^{-1}	Origine de l'azote					
			NdfFix		NdfF		NdfS	
			%	kg N ha^{-1}	%	Kg N ha^{-1}	%	Kg N ha^{-1}
44/A/73	20	146,0	75,6	110,4	3,1	4,5	21,3	31,1
	100	171,6	75,6	129,8	12,4	21,3	12,0	20,5
4/73	20	88,3	73,0	64,5	3,3	2,9	23,7	20,9
	100	110,5	62,6	69,2	18,3	20,2	19,1	21,1
22/72	20	156,7	80,5	126,1	2,5	3,9	17,0	26,7
	100	175,5	75,3	132,3	12,7	22,2	12,0	21,0
26/72	20	167,0	85,6	143,0	1,9	3,1	12,5	20,9
	100	185,6	75,8	140,8	12,2	22,7	12,0	22,1
JUPITER	20	144,2	74,9	108,1	3,1	4,5	22,0	31,6
	100	151,4	72,2	109,4	14,2	21,4	13,6	20,6
p.p.d.s(1) entre moyennes des traitements principaux				13,6	-	-		
p.p.d.s entre moyennes des sous-traitements				9,8	-	-		
p.p.d.s entre les traitements 20 N				-	0,7	0,6		
p.p.d.s entre les traitements 100 N				-	N.S	N.S		

(1) p.p.d.s à P = 0.05.

Azote apporté : voir tableau 16 A.

Tableau 20A : Rendements kg M.S ha^{-1} des différents organes végétatifs (moyenne de 5 répétitions).
N total % des différents organes végétatifs (moyenne pondérée)
N total kg ha^{-1} des différents organes végétatifs et de la plante entière (moyenne de 6 répétitions). Bambey, essai IX.

Traitements	Rendements matière sèche kg ha^{-1}						% N total						N total kg ha^{-1}						
	Tige	Feuille	Paille	Cosse	Graine	Gousse	Tige	Feuille	Paille	Cosse	Graine	Gousse	Tige	Feuille	Paille	Cosse	Graine	Gousse	Total
1	1206	755	1961	681	1459	2163	1.06	1.39	1.19	1.09	5.67	4.77	12.78	10.49	23.27	7.42	82.72	90.14	113.41
3	1444	756	2200	794	1553	2304	1.04	1.75	1.28	0.97	5.43	3.99	15.02	13.23	28.25	7.70	84.33	92.03	120.28
4	1279	657	1936	760	1590	2340	1.00	1.83	1.28	1.12	5.42	4.05	12.79	12.02	24.81	8.51	86.18	94.69	119.50
5	1277	778	2055	703	1419	2086	1.01	2.39	1.53	0.98	5.76	4.25	12.90	18.59	31.49	6.89	81.73	88.62	120.11
6	1213	751	1964	667	1465	2133	1.08	1.76	1.34	1.01	5.64	4.19	13.10	13.22	26.32	6.74	82.63	89.37	115.69
7	1432	828	2260	769	1590	2354	1.18	1.86	1.43	1.14	5.57	4.13	16.90	16.40	32.30	8.77	88.56	97.33	129.63
8	1426	705	2131	746	1681	2418	0.97	1.82	1.25	1.11	5.59	4.22	13.83	12.83	26.66	8.28	93.77	102.05	128.71
9	1363	880	2243	781	1522	2295	1.06	1.99	1.43	1.28	5.63	4.17	14.45	17.51	31.96	10.00	85.69	95.69	127.65
10	1391	737	2128	730	1574	2310	1.02	1.86	1.31	1.13	5.53	4.13	14.19	13.71	27.90	8.25	87.04	95.29	123.19
11	1405	804	2209	743	1643	2373	0.91	1.67	1.19	0.97	5.65	4.22	12.79	13.43	26.22	7.21	92.83	100.04	126.26
12	1383	698	2081	775	1616	2369	1.23	1.80	1.42	0.92	5.67	4.17	17.01	12.56	29.57	7.13	91.63	98.76	128.33
C.V.	12.2	17.8	12.5	11.1	11.7	10.7	9.3	8.0	7.1	18.3	3.1	3.8	15.9	19.5	14.7	23.9	11.5	11.2	/////////

Les poids de gousses figurant dans ce tableau sont ceux résultant de la pesée et non de la somme cosses + graines.

Tableau 21A: Effet de l'engrais azoté apporté au semis sur le bilan de l'azote dans l'arachide variété 55-437. Bambey, essai IX.

Traitement N°	Dose N kg ha^{-1}	Organe plante	N total kg ha^{-1}	NdfF %	NdfF kg ha^{-1}	CRU %	Valeur A kg ha^{-1}	Valeur A fixation kg ha^{-1}	NdFFix %	NdFFix kg ha^{-1}
1	0 N	Grains	82.72							
		Coques	7.42							
		Tiges	12.78							
		Feuilles	10.49							
		Total	113.41							
4	15 N	Grains	86.18	2.44	2.10	14.00				
		Coques	8.51	2.94	0.25	1.67				
		Tiges	12.79	2.66	0.34	2.27				
		Feuilles	12.02	2.16	0.26	1.73				
		Total	119.50	2.47	2.95	19.7	592	264	43.7	52.2
7	30 N	Grains	88.56	4.62	4.09	13.63				
		Coques	8.77	4.90	0.43	1.43				
		Tiges	16.90	5.50	0.93	3.10				
		Feuilles	16.40	4.39	0.72	2.40				
		Total	129.63	4.76	6.17	20.6	600	272	43.2	56.0
10	60 N	Grains	87.04	11.90	10.36	17.27				
		Coques	8.25	13.70	1.13	1.88				
		Tiges	14.19	13.95	1.98	3.30				
		Feuilles	13.71	12.11	1.66	2.77				
		Total	123.19	12.28	15.13	25.2	429	101	20.7	25.5
3	120 N	Grains	84.33	23.13	19.51	16.26				
		Coques	7.70	25.06	1.93	1.61				
		Tiges	15.02	24.66	3.70	3.08				
		Feuilles	13.23	22.60	2.99	2.49				
		Total	120.28	23.39	28.13	23.4	393	65	12.7	15.3
2	Référence mil 120 N	Grains	39.66	27.7	10.97	9.1				
		Tiges	35.82	25.3	9.06	7.5				
		Feuilles	18.69	27.7	5.17	4.3				
		Total	94.17	26.8	25.20	21.0	328			

Azote apporté sous forme d'urée.

Chaque valeur est moyenne de 5 répétitions.

Tableau 22 A : Valeur de Ntotal total plante en mg N lysimètre^{-1}, de l'excès isotopique (%) et du % NdfFix, pour le soja, l'arachide et le mil en culture pure ou associée. Bambey, essai en lysimètre X.

	N total mg lysimètre^{-1}		Excès isotopique %		% NdfFix	
	Pure	Associée	Pure	Associée	Pure	Associée
Soja 1 (4 pieds)	4164	5588	0.025	0.016	86	91
Soja 2 (4 pieds)	8282	7230	0.025	0.008	86	95
Arachide 3 (2 pieds)	3681	2728	0.064	0.026	76	90
Mil pur (4 pieds) et Mil_1 associé (1 pied)	530	217	0.174	0.195	-	-
Mil pur (4 pieds) et Mil_2 associée (1 pied)	530	150	0.174	0.158	-	-
Mil pur (2 pieds) et Mil_3 associé (1 pied)	290	336	0.253	0.272	-	-
C.V légumineuse	17.0		11.8 %			
C.V. mil	23.8		7.5 %			

Chaque valeur est la moyenne de 5 répétitions.

- Soja 1 : non inoculé mais contamination par Bradyrhizobium japonicum ayant induit une fixation de N_2 tardive.
- Soja 2 : inoculé par Bradyrhizobium japonicum
- Poids de sol par lysimètre = 70 kg ; E % azote total sol ± intervalle de confiance = 0.070 ± 0.0096(soj 0.101 ±0.013(arach
- Pour le calcul du % NdfFix selon l'équation 19 page 67 , on a pris respectivement pour soja 1, soja 2 et arachide 3, E % = 0,120, E % = 0.170 et E % = 0,263 (E % moyens pondérés correspondant aux dix lysimètres).

Tableau 23A : Effet des amendements sur le bilan de l'azote dans l'arachide variété 55-437 et variété non nodulante. Thilmakha, essai XI.

Traitement	Organe plante	Rendement M.S. kg ha^{-1}	Rendement N total kg ha^{-1}	N.d.f.F		C.R.U.	Valeur A kg ha^{-1}	Valeur A fixation kg ha^{-1}	N.d.f.Fix	
				%	kg ha^{-1}	%			%	kg ha^{-1}
Témoin	Grains	92.32	4.91	8.34	0.410	2.95				
	Coques	80.80	1.20	9.92	0.119	0.86				
	Pailles	744.80	15.95	8.55	1.364	9.81				
	Total	917.92	22.06	8.59	1.89	13.6	148	108	66.7	10.8
+ Chaux	Grains	182.06	10.04	3.21	0.322	2.32				
	Coques	151.35	3.46	3.76	0.130	0.93				
	Pailles	1296.83	31.53	3.94	1.242	8.93				
	Total	1630.24	45.04	3.75	1.69	12.2	357	300	81.6	36.7
+ Fumier	Grains	338.10	19.72	2.13	0.419	3.02				
	Coques	252.09	5.87	1.92	0.113	0.81				
	Pailles	2478.16	59.69	2.17	1.29	9.29				
	Total	3068.3	85.28	2.13	1.82	13.1	638	483	74.0	63.1
Témoin	Total non nod.	1436.82	22.30	65.55	14.60	17.28	40			
+ Chaux	Total non nod.	2339.8	46.54	57.31	26.67	34.72	57			
+ Fumier	Total non nod.	2665.40	56.70	32.95	18.65	24.28	156			

Chaque valeur est moyenne de 6 répétitions.

Azote apporté :

sur var. 55-437 = 13,9 kg ha^{-1} avec E = 4,94 % sous forme $(NH_4)_2 SO_4$

sur non nod. = 76,8 kg ha^{-1} avec E = 0,78 % sous forme $(NH_4)_2 SO_4$

La Valeur A et le NdfFix exprimés en kg N ha^{-1} sont calculés pour chaque parcelle ; c'est la moyenne de ces différentes valeurs qui figure dans le tableau ci-dessus. Ceci explique certaines différences entre la valeur de ce NdfFix et celle qui résulte du calcul fait à partir des moyennes pondérées de % NdfF. Toutes les moynnes sont pondérées.

Tableau 24A : Effet des engrais azotés et phosphatés sur le bilan de l'azote dans le soja. Variété 44/A/73 au stade floraison et initiation remplissage des gousses (I.R.G). Séfa, essai XII.

Traitement	Stade	Rendement M.S. kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	NdfF		CRU	Valeur A	Valeur A fixation	NdfFix	
				%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}
R, P	floraison	2293	57.5	5.48	3,29	19.4	309	168	53.6	33
R, PO	"	1872	46.7	7.35	3.34	19.7	237	87	36.0	17
RO, P	"	2694	64.6	48.90	31.79	26.5	141			
RO, PO	"	2145	49.5	51.60	25.05	20.9	150			
R, P	I.R.G.	3945	106.5	4.79	5.53	32.5	351	152	40.6	45
R, PO	"	2783	75.2	5.97	4.40	25.8	276	82	28.2	21
RO, P	"	4423	106.4	38.0	40.84	34.0	199			
RO, PO	"	3288	83.4	39.0	29.57	24.7	194			

R : inoculé avec bradyrhizobium ; Ro non inoculé

P : avec phosphate ; Po sans phosphate

Azote apporté : R reçoit 17,0 kg N ha^{-1} $(NH_4)_2 SO_4$ E % = 0,76

Ro reçoit 120,0 kg N ha^{-1} $(NH_4)_2 SO_4$ E % = 4,85

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions.

Tableau 25 A : Effet des engrais azotés et phosphatés sur le bilan de l'azote dans le soja. Variété 44/A/73 au stade maturité. Séfa, essai XII.

Traitements	Organes	Rendement M.S. kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	NdfF		CRU	Valeur A kg ha^{-1}	Valeur A fixation kg ha^{-1}	NdfFix	
				%	kg ha^{-1}	%			%	kg ha^{-1}
Inoculé + phosphate	Grain	1600	99.4	2.91	3.16	18.5				
	Paille	3452	42.6	4.57	2.12	12.5				
R, P	Total	5052	141.9	3.72	5.28	31.0	449	118	26	37
Inoculé sans phosphate	Grain	1280	83.7	2.69	2.25	13.2				
	paille	2872	25.0	3.80	0.95	5.6				
R, Po	Total	4152	108.7	2.86	3.20	18.8	592	329	55	62
Non Inoculé + phosphate	Grain	1448	87.9	26.5	23.33					
	Paille	3474	26.6	30.8	8.81					
Ro, P	Total	4922	114.5	27.8	32.14	26.4	331			
Non Inoculé sans phosphate	Grain	1150	72.9	35.1	25.61	21.3				
	Paille	2727	20.6	42.4	7.31	7.3				
Ro, Po	Total	3877	93.5	31.6	30.41	28.6	263			

Azote apporté : voir tableau 24.

Chaque valeur est moyenne de 6 répétitions.

Tableau 26A : Effet des engrais azoté et phosphaté sur la matière sèche, le Ntotal et le P total du soja au stade maturité. Séfa, essai XII.

Traitements			RENDEMENT PLANTE ENTIERE kg ha^{-1}								
			Matière sèche			N total			P total		
N kg ha^{-1}	P kg ha^{-1}	Inoculation	Grain	Paille	Total	Grain	Paille	Total	Grain	Paille	Total
17	0	+	1280	2872	4152	84	25	109	4.7	1.0	5.7
17	22	+	1600	3452	5052	99	43	142	8.0	2.9	10.9
120	0	0	1150	2727	3877	73	21	94	4.9	1.0	5.9
120	22	0	1448	3474	4922	88	27	115	7.8	2.3	10.1
C.V. %			11	13	12	14	16	13	13	23	14
p.p.d.s.			191	515	684	14.4	5.7	18.8	1.0	0.5	1.4

Tableau 27A : Effet des engrais azoté et phosphaté sur la matière sèche, le N-total et le P-total du soja aux trois principaux stades végétatifs - Séfa, essai XII.

Traitements			RENDEMENT PLANTE ENTIERE kg ha^{-1}								
			Matière sèche			N-total			P-total		
N kg ha^{-1}	P kg ha^{-1}	Inoculation	Floraison	Remplissage des gousses	Maturité	Floraison	Rempl. des gous.	Maturité	Flor.	Rempl. des gous.	Maturité
17	0	+	1872	2783	4152	47	75	109	3.6	4.5	5.7
17	22	+	2293	3945	5052	57	106	142	6.2	9.3	10.9
120	0	0	2145	3288	3877	49	83	94	4.1	5.6	5.9
120	22	0	2694	4423	4922	65	106	115	7.2	9.8	10.1
C.V. %			18	18	12	16	19	13	28	24	14
p.p.d.s.			502	793	684	10.8	21.6	18.8	1.8	2.1	1.4

Tableau 28A : Ptotal absorbé, Ntotal absorbé et M.S. produite en cours de cycle exprimés en pourcentage de Ptotal, Ntotal et M.S. à la maturité - Séfa, essai XII.

Traitements			Levée (V_1) → Floraison (R_2)			Floraison (R_2) → Remplissage gousses (R_5)			Remplissage gousses (R_5) → Maturité (R_8)		
N kg ha-1	P kg ha-1	Inoculation	% P	% N	% M.S.	% P	% N	% M.S.	% P	% N	% M.S.
17	0	+	62	43	45	16	26	22	22	31	33
17	22	+	57	40	45	28	35	33	15	25	22
120	0	0	70	52	55	25	36	29	5	12	15
120	22	0	71	56	55	26	25	35	2	8	10

V_1, R_1 Stades végétatifs

R_1, R_5, R_8 Stades reproductifs

Tableau 29A : Sources d'azote et valeur A du soja au stade floraison - Séfa, essai XII.

Traitements			NdfFix		NdfS		NdfF		Valeur A
N jg ha^{-1}	P kg ha^{-1}	Inoculation	% Ntotal	kg ha^{-1}	% Ntotal	kg ha^{-1}	% Ntotal	kg ha^{-1}	kg N ha^{-1}
17	0	+	36	17	57	27	7.0	3.3	237
17	22	+	54	33	41	25	5.4	3.3	309
120	0	0	0	0	50	24	50.6	25.1	150
120	22	0	0	0	51	33	49.2	31.8	141

Analyse de variance

(NdfFix kg ha^{-1} : C.V. = 16 % ; ppds = 5.3 kg N ha^{-1}

(NdfF kg ha^{-1} : - pour les traitements 17 N : C.V. = 16 % ; p.p.d.s = 0,92 kg N ha^{-1}

(- pour les traitements 120 N : C.V. = 17 % ; p.p.d.s = 9.3 kg N ha^{-1}

(Valeur "A" : C.V. = 20 % ; p.p.d.s = 67 kg N ha^{-1}

Azote apporté voir tableau 24A.

Tableau 30A : Sources d'azote et valeur A du soja au stade remplissage des gousses - Séfa, essai XII.

Traitements			NdfFix		NdfS		NdfF		Valeur A
N kg ha^{-1}	P kg ha^{-1}	Inoculation	% Ntotal	kg ha^{-1}	% Ntotal	kg ha^{-1}	% Ntotal	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}
17	0	+	28	21	66	50	5.8	4.4	276
17	22	+	41	45	55	62	4.8	5.4	351
120	0	0	0	0	62	48	39.0	29.6	194
120	22	0	0	0	62	67	38.0	40.8	199

(- NdfF kg ha^{-1} : C.V. = 24 % ; ppds = 7,8 kg N ha^{-1}

(- NdfF kg ha^{-1} : pour les traitements 17 N : C.V. = 25 % ; p.p.d.s = 2.2 kg N ha^{-1}

(pour les traitements 120 N : C.V. = 15 % ; p.p.d.s = 12.1 kg N ha^{-1}

(

(

Analyse de variance

(

(

(- Valeur A : C.V. = 20 % ; p.p.d.s = 67 kg N ha^{-1}.

Azote apporté voir tableau 24A.

Tableau 31A : Sources d'azote et valeur A du soja au stade maturité - Séfa, essai XII.

Traitements			NdfFix		NdfS		NdfF		Valeur A
N kg ha^{-1}	P kg ha^{-1}	Inoculation	% Nt	kg ha^{-1}	% Nt	kg ha^{-1}	% Nt	kg ha^{-1}	kg N ha^{-1}
17	0	+	55	62	42	48	2.8	3.2	592
17	22	+	26	37	70	100	3.7	5.3	449
120	0	0	0	0	68	64	31.6	30.4	263
120	22	0	0	0	72	83	26.8	31.7	331

Analyse de variance

(- NdfFix kg ha^{-1} : C.V. = 14 % ; ppds = 9,2 kg N ha^{-1}

(- NdfF kg ha^{-1} : pour les traitements 17 N : C.V. = 14 % ; p.p.d.s = 1,0 kg N ha^{-1}
pour les traitements 120 N : C.V. = 19 % ; p.p.d.s = 10.2 kg N ha^{-1}

(- Valeur A : C.V. = 15 % ; p.p.d.s = 87 kg N ha^{-1}.

Azote apporté voir tableau 24 A.

Tableau 32A : Rendements kg M.S ha^{-1} des différents organes végétatifs (moyenne de 5 répétitions).
N total % des différents organes végétatifs (moyenne pondérée)
N total kg ha^{-1} des différents organes végétatifs et de la plante entière (moyenne de 5 répétitions). Bambey, essai XIII.

TRAITEMENTS	Rendements matière sèche kg ha^{-1}						% N total						N total kg ha^{-1}						
	Tige	Feuille	Paille	Cosse	Graine	Gousses	Tige	Feuille	Paille	Cosse	Graine	Gousses	Tige	Feuille	Paille	Cosse	Graine	Gousses	Total
1	1405	904	2309	471	1481	1953	1.10	2.31	1.57	0.84	4.86	3.89	15.46	20.90	36.36	4.00	72.20	76.00	112.36
2	1548	900	2449	426	1420	1845	1.14	2.17	1.52	0.85	4.36	3.55	17.65	19.50	37.15	3.60	61.90	65.50	102.65
3	1580	893	2347	450	1459	1909	1.18	2.24	1.65	0.79	4.42	3.57	18.64	20.00	38.64	3.60	64.47	68.07	106.71
4	1629	917	2546	483	1568	2056	1.17	2.38	1.60	0.80	4.59	3.69	19.06	21.80	40.86	3.90	71.95	75.85	116.71
5	1373	884	2258	482	1431	1860	1.10	2.28	1.56	0.75	4.58	3.71	15.10	20.20	35.30	3.60	65.53	69.13	104.43
6	1520	947	2467	450	1479	1929	1.12	2.18	1.53	0.79	4.29	3.48	17.02	20.70	37.72	3.60	63.45	67.05	104.81
7	1520	848	2368	464	1504	1967	1.09	2.18	1.48	0.79	4.41	3.56	16.57	18.50	35.07	3.70	66.31	70.01	105.08
8	1530	902	2432	442	1466	1908	1.18	2.12	1.53	0.83	4.37	3.55	18.25	19.10	37.35	3.70	64.08	67.78	104.93
9	1537	974	2511	515	1592	2107	1.26	2.46	1.73	0.81	4.46	3.57	19.37	24.00	43.37	4.20	70.93	75.13	118.55
10	1489	975	2464	493	1543	2036	1.08	2.26	1.55	0.82	4.37	3.51	16.08	22.00	38.08	4.00	67.45	71.45	109.53
11	4796	2180	6976	-	2561	-	0.56	0.82	0.64	-	1.29	-	26.86	17.88	44.74	-	33.04	-	77.78
xxxxxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	
12	1311	889	2199	393	1382	1775	1.09	2.06	1.47	0.82	4.68	3.82	14.29	18.30	32.39	3.20	64.68	68.67	100.27
C.V.	10.9	15.2	10.8	12.7	9.5	9.2	10.0	11.4	12.9	15.5	8.2	7.9	17.5	19.2	14.9	12.0	11.6	11.0	7.4

Les poids de gousses figurant dans ce tableau sont ceux résultant de la pesée et non de la somme cosses + graines

Les C.V. sont établis sur tous les traitements sauf le 11.

Tableau 33A: Effet de l'inoculation (souche et méthode) sur le bilan de l'azote dans l'arachide 55-437. Bambey, essai XIII.

Traitement N°	Inoculation	Organe plante	N total kg ha^{-1}	NdfF %	NdfF kg ha^{-1}	CRU %	Valeur A kg ha^{-1}	Valeur A fixation kg ha^{-1}	NdfFix %	NdfFix kg ha^{-1}
	Non	Grains	61.90	1.97	1.22	8.13				
		Coques	3.60	3.06	0.11	0.73				
2	inoculé	Tiges	17.65	3.29	0.58	3.87				
		Feuilles	19.50	1.64	0.32	2.13				
		Total	102.65	2.17	2.23	14.87	687	475	65.8	67.5
	CB 756	Grains	65.53	1.91	1.25	8.33				
	graines	Coques	3.60	3.06	0.11	0.73				
5	enrobées	Tiges	15.10	2.98	0.45	3.00				
		Feuilles	20.20	1.68	0.34	2.27				
		Total	104.43	2.06	2.15	14.33	719	507	68.9	71.9
		Grains	63.45	1.83	1.16	7.73				
	Su 430	Coques	3.60	2.78	0.10	0.67				
6	graines	Tiges	17.02	3.52	0.60	4.00				
	enrobées	Feuilles	20.70	2.13	0.44	2.93				
		Total	104.81	2.29	2.40	16.00	708	496	69.9	73.3
		Grains	66.31	1.98	1.31	8.73				
	CB 756	Coques	3.70	2.97	0.11	0.73				
7	sol	Tiges	16.57	3.38	0.56	3.73				
	inoculé	Feuilles	18.50	1.68	0.31	2.07				
	au semis	Total	105.08	2.18	2.29	15.27	692	480	70.0	73.6
		Grains	64.08	1.62	1.04	6.93				
	Su 430	Coques	3.70	2.43	0.09	0.60				
8	sol	Tiges	18.25	3.01	0.55	3.67				
	inoculé	Feuilles	19.10	1.67	0.32	2.13				
	au semis	Total	105.13	1.90	2.00	13.33	753	540	66.9	70.2
		Grains	70.93	1.95	1.38	9.20				
	CB 756	Coques	4.20	2.38	0.10	0.67				
9	sol	Tiges	19.37	3.15	0.61	4.07				
	inoculé à	Feuilles	24.00	1.54	0.37	2.47				
	à 2 semaines	Total	118.50	2.08	2.46	16.45	779	567	71.3	84.5
		Grains	67.45	1.48	1.00	6.67				
	Su 430	Coques	4.00	2.50	0.10	0.67				
10	sol	Tiges	16.08	2.11	0.34	2.27				
	inoculé	Feuilles	22.00	1.54	0.34	2.27				
	à 2 semaines	Total	109.53	1.63	1.78	11.87	965	753	75.2	82.4
		Grains	33.04	23.46	7.75	9.69				
	Référence	Tiges	26.86	19.17	5.15	6.44				
11	mil	Feuilles	17.88	31.32	5.64	7.05				
	80 N									
		Total	77.78	23.84	18.54	23.18	212			

ote apporté = 15 kg ha^{-1} avec E = 4,04 % sous forme d'urée
achide

ote apporté = 80 kg ha^{-1} avec E = 1,04 % sous forme d'urée

que valeur est moyenne de 5 répétitions.

Tableau 34A : Effet de l'inoculation par Bradyrhizobium associé ou non avec Glomus mosseae (endomycorrhize) sur le bilan de l'azote dans le soja. Variété 44/A/73. Séfa, essai XIV.

Traitements	Organes	Rendement		NdfF		CRU	Valeur A	Valeur A fixation	NdfFix	
		M.S. kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}
Inoculé	Cosses	792	4.712	2.39	0.112	0.650				
avec	Feuilles	1427	10.617	3.71	0.393	2.286				
G_3	Tiges	1016	6.143	5.67	0.348	2.023				
sans	Grain	1396	87.160	2.20	1.920	11.140				
phosphate	Total		108.63	2.55	2.77	16.10	684.14	478.60	67.30	73.11
Inoculé	Cosses	976	6.435	1.90	0.122	0.709				
avec	Feuilles	1967	15.988	3.06	0.490	2.847				
G_3	Tiges	1259	5.500	3.87	0.213	1.238				
+ super-	Grain	2018	128.180	1.74	2.23	12.970				
phosphate	Total		156.10	2.00	3.12	17.76	850.28	608.76	69.83	109.00
Inoculé	Cosses	976	5.589	1.84	0.103	0.598				
avec	Feuilles	1881	14.391	3.44	0.488	2.837				
G_3	Tiges	1213	5.627	4.28	0.241	1.400				
+ phosphate	Grain	1883	123.83	1.70	2.110	12.24				
tricalcique	Total		149.44	1.97	2.94	27.07	893.52	675.28	73.80	110.29
Inoculé	Cosses	861	4.931	2.42	0.119	0.694				
avec	Feuilles	1507	11.564	3.89	0.450	2.612				
G_3	Tiges	1000	5.761	4.91	0.283	1.644				
+ Glomus m.	Grain	1489	97.75	2.28	2.23	12.960				
sans phosphate	Total		120.01	2.57	3.08	17.91	687.22	453.12	66.85	80.23
Inoculé	Cosses	1117	7.417	1.54	0.114	0.663				
avec	Feuilles	1946	14.272	2.79	0.399	2.316				
G_3	Tiges	1454	7.594	3.38	0.257	1.492				
+ Glomus m.	Grain	2290	154.350	1.42	2.190	12.740				
+Super- phosphate	Total		183.63	1.61	2.96	17.21	1095.55	854.04	75.88	139.30
Inoculé	Cosses	998	6.159	1.99	0.122	0.711				
avec	Feuilles	1879	14.139	3.76	0.524	3.043				
G_3	Tiges	1183	5.728	4.75	0.272	1.581				
+ Glomus m.	Grain	1893	125.610	1.76	2.260	13.130				
+ phosphate tricalcique	Total		151.63	2.10	3.18	18.46	829.21	610.96	71.60	108.57

G_3 = souche de bradyrhizobium effective

Azote apporté : 17,21 kg ha^{-1} N E = 4,73 % sous forme de $(NH_4)_2 SO_4$

Chaque valeur est la moyenne de 8 répétitions.

Tableau 35A : Calcul de la valeur A "sol" pour les différents traitements de référence "non nod." - Séfa, essai XIV.

Traitements	Organes	Rendement		NdfF		CRU	Valeur A	Valeur A fixation	NdfFix	
		M.S. kg ha^{-1}	N total kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}
90 N	Cosses	879	4.752	26.63	1.266	1.406				
non	Feuilles	1799	11.353	34.46	3.912	4.345				
inoculé	Tiges	1447	6.401	38.02	2.434	2.703				
sans	Grain	1377	82.820	24.92	20.640	22.920				
phosphate	Total		105.33	26.82	28.25	31.37	245.39			
90 N	Cosses	1024	5.510	23.48	1.294	1.437				
non	Feuilles	2289	13.824	33.39	4.615	5.126				
inoculé	Tiges	1753	6.621	38.52	2.550	2.832				
+	Grain	1716	97.970	22.21	21.760	24.170				
super-phosphate	Total		123.93	24.38	30.22	33.56	286.93			
90 N	Cosses	1028	5.620	21.76	1.223	1.359				
non	Feuilles	2249	13.095	31.44	4.114	4.569				
inoculé	Tiges	1649	6.164	35.53	2.190	2.432				
+ phosphate	Grain	1811	107.720	20.56	22.150	24.600				
tricalcique	Total		132.60	22.38	29.68	32.96	313.18			
90 N	Cosses	7710	3.931	30.87	1.213	1.347				
inoculé	Feuilles	1496	9.916	36.73	3.642	4.045				
avec G_1	Tiges	1109	4.657	42.64	1.986	2.205				
sans	Grain	1093	65.680	30.32	19.910	22.120				
phosphate	Total		84.18	31.78	26.75	29.72	204.34			
90 N	Cosses	1041	5.944	26.70	1.587	1.763				
inoculé	Feuilles	2133	13.419	34.37	4.611	5.122				
avec G_1	Tiges	1675	6.234	38.43	2.396	2.661				
+ super	Grain	1725	101.550	24.32	24.69	27.42				
phosphate	Total		127.15	26.17	33.280	36.970	246.21			
90 N	Cosses	920	5.136	30.83	1.583	1.758				
inoculé	Feuilles	1956	12.279	37.43	4.597	5.105				
avec G_1	Tiges	1481	5.527	42.32	2.339	2.598				
+ phosphate	Grain	1482	86.170	27.91	24.040	26.690				
tricalcique	Total		109.11	29.83	32.56	36.15	216.00			

Azote apporté = 90,04 kg ha^{-1} E = 1,010 % sous forme de $(NH_4)_2 SO_4$

Chaque valeur est la moyenne de 8 répétitions.

Tableau 36 A

Estimation de la contribution de la chaux et de fumier à l'enchissement de l'azote total du sol (selon la figure 27)

---

(1) Apport de fumier

Des doses d'apport identiques peuvent correspondre des quantités d'azote très différentes, les principales causes de variation étant les pourcentages de matière sèche, de terre humifère et d'azote total . Rappelons que la dose apportée est de 10 t ha^{-1} en poids frais tous les deux ans.

(2) Apport de chaux

Apport de 600 kg ha^{-1} tous les deux ans, de chaux éteinte.

(3) Input d'azote provenant du fumier

Le fumier subissant des pertes importantes dès son apport, variables selon l'époque et le mode de placement (HAMOND 1972, GANRY et GUIRAUD 1979), nous préférons évaluer l'input azote "fumier" contribuant effectivement à l'enrichissement du sol. En revanche, en ce qui concerne l'input N_2 fixé calculé en (4) ci-dessous, son apport au sol étant étalé dans le temps et réparti de façon assez homogène dans le sol, nous faisons l'hypothèse que les risques de pertes sont très atténués par rapport au fumier.

L'input azote "fumier" est calculé d'après GANRY et GUIRAUD (1979). Ces auteurs trouvent pour un apport de fumier de 10 t M.S ha^{-1}, enfoui, correspondant à 220 kg N ha^{-1}, sans engrais azoté, un enrichissement de l'azote total du sol, par rapport au témoin, de +19 % (+11 % sans les résidus de fumier), soit environ + 100 kg N ha^{-1} an^{-1} dans le sol étudié (sol sableux "dior"). On retiendra donc le coefficient de transformation de 0,50, à savoir que 2 kg N ha^{-1} de fumier enrichissent l'azote total du sol de 1 kg N ha^{-1} après un cycle cultural. Dans une autre expérience étudiant la décomposition de plusieurs matières végétales en sol nu sans engrais azoté, on trouve un coefficient de 0,60 au bout d'un an (GANRY 1977). A Thilmakha, nous estimons donc qu'un apport bisannuel de fumier évalué en azote total entre 40 et 80 kg N ha^{-1} procure un enrichissement du sol compris entre 20 et 40 kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$.

Il apparait alors intéressant de tester la validité de ce coefficient de transformation sur l'essai longue durée de Thilmakha en objet et pour cela de comparer deux données :

- première donnée mesurée : ΔNt = variation de l'azote total du sol dans le temps par rapport à un témoin

Après six apports de fumier, on trouve sur 40 cm de sol respectivement pour les traitements sans et avec fumier, 100 ppm d'azote (profil peu différencié) et 125 ppm (130 ppm dans 0-20 cm et 120 ppm dans 20-40 cm) (d'après WEY 1987 et CISSE 1986), ce qui donne une augmentation d'environ 150 kg N ha^{-1} due au fumier au bout de onze ans (après six apports) ;

- deuxième donnée calculée : Nt = quantité d'azote total provenant du fumier au bout de t années.

Nous considérons les valeurs suivantes :

A = apport d'azote bisannuel par le fumier (cette quantité d'azote résulte d'une biodégradation sur un an du fumier apporté)
c = coefficient de pertes annuel moyen
n = nombre d'apports de fumier
t = nombre d'années
$t = 2n$
Nt = azote total provenant du fumier au bout de t années

On prend comme hypothèse simplificatrice que chaque apport de fumier A est soumis à une dégradation exponentielle et tend vers une fraction humique A_∞ ; au bout de n apports tous les deux ans sur t années, la quantité d'azote total formée à partir du fumier sera :

$$Nt = \sum_{i=o}^{i=n} (A - A_\infty)e^{-kti} + A_\infty$$

Tableau 36 A (suite)

Si l'apport de fumier est fait en début de cycle de l'année to, Nt est calculé au début de cycle de l'année tn = 2n.

Dans l'essai XI en objet, nous prenons les valeurs suivantes :

- A = 30 kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$ (moyenne admise ci-dessus) ;
- A_ω = 5 kg N ha^{-1} (valeur estimée) ;
- date du premier apport de fumier : début de cycle cultural 1973 ;
- nombre d'apports = 5 ;
- c = 0,18. Il s'agit de la valeur d'un coefficient de pertes annuel de l'azote organique du sol, d'origine végétale, mesurée expérimentalement après un cycle pluviométrique (GANRY 1977).

L'équation 13 appliquée aux valeurs ci-dessus donne Nt = 73 kg N ha^{-1} en début de cycle de l'année 1983. En fin de cycle 1983, après le sixième apport de fumier réalisé en début de cycle 1983, la valeur de Nt est la suivante :

Nt = 30 + 73 = 103 kg N ha^{-1} arrondi à 100 kg N ha^{-1}.

Les valeurs de ces deux données sont cohérentes, leur différence : 150 - 100 = 50 kg N ha^{-1} étant due à l'input N_2 fixé induit par le fumier.

(4) Input d'azote provenant de la fixation de N2 induite par les amendements

Il s'agit de l'input N_2 fixé retournant au sol à travers la biomasse constituée des défiolations et des racines à la récolte et à travers la biomasse racinaire incorporée au sol en cours de cycle (exsudats + racines).

Cette première a été évaluée en N total par CHARREAU et TOURTE (1967), respectivement en systèmes traditionnels et améliorés, à 30 % et 15 % de N total plante contenu dans les parties aériennes, donc, exprimée en N_2 fixé, à 30 % et 15 % de NdfFix (on admet que les % NdfFix sont semblables).

Cette deuxième est très variable, l'exsudation étant fortement liée aux conditions environnementales ; elle a été estimée dans deux expériences antérieures (a) en vases de végétation, à 30 % de NdfFix (GANRY 1977), (b) en lysimètres à 38 % de NdfFix (GANRY et GUIRAUD, non publié). Une valeur de 10 à 50 % de NFix est citée dans la littérature pour les légumineuses en général (BIET et BRUNEL 1968, DOMMERGUES et MANGENOT 1970) mais ces derniers auteurs reconnaissent que de telles exsudations sont parfois discrètes et inexistantes. C'est sans doute pour cet input que l'incertitude est la plus grande en raison du manque de résultats expérimentaux, particulièrement en zone semi-aride.Ceci étant, nous estimons la fixation de N_2 dans la biomasse racinaire à 30 % de NdfFix (23 % de NFix dans le système sol-plante).

Dans l'essai XI à Thilmakha, pour avoir une estimation de l'input N_2 fixé retournant au sol, nous devons rappeler 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 un système traditionnel en cours de régénération (régénération faible) et le troisième un système en phase de régénération avancée assimilé à un système amélioré. Considérant ces trois gradients dans la 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 NdFix, et au système en phase de régénération avancée (assimilé à un système amélioré) la valeur de 45 % (15 % + 30 %). Dans l'essai XI en objet, en l'état actuel du système, donc après six amendements du sol (un amendement tous les deux ans), compte tenu des valeurs précédentes appliquées aux résultats du tableau 26, 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 admettons les inputs moyens de 5, 19 et 24 kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$ respectivement pour le sol sans amendement et avec amendements calciques à organiques.

(5) Azote sol fourni par le sol à l'arachide

Tableau 36 A (suite)

(6) Azote total du sol

L'augmentation de l'azote total du sol estimée à 150 kg N ha^{-1} (voir ci-dessus) est due aux inputs d'azote provenant de trois sources et immobilisés dans le sol :

(a) l'input "fumier" qu'on admettra constant dans le temps en moyenne de 30 kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$,

(b) l'input N_2 fixé induit par le fumier est qui est progressif dans le temps durant la phase de régénération que nous estimons de 5 à 25 kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$ (voir paragraphe (4) ci-dessus),

(c) l'input azote engrais qu'on estime à 5 kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$ (on fait l'hypothèse d'un Nis de 15 %,

soit au total (a) + (b) + (c) = à 60 kg N ha^{-1} $2ans^{-1}$, soit 30 kg N ha^{-1} an^{-1}.

Si on suppose que les conditions énoncées au paragraphe II.4.2 page 51 sont remplies et que le système est proche de son niveau d'équilibre, on peut tenter le calcul du coefficient K_2, en prenant :

- A = 30 kg N ha^{-1} (système avec fumier)
- N au bout de 12 ans proche de N_∞ (on fait l'hypothèse que le système est en fin de régénération)
- profondeur de sol = 40 cm, soit une quantité d'azote total N ≃ 125 ppm x 6000 t terre ha^{-1} = 750 kg N ha^{-1},
  l'équation 8 de la page 51 devient :

$$30 = k_2 \times 750$$

dont la solution est $k_2 = 0,04$

SIBAND (1972) cité par CHARREAU (1974) trouve également un coefficient de 0,04 pour l'azote dans un sol cultivé de Casamance (Sud Sénégal) ; CHARREAU (1967) trouve pour 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).

Tableau 37 A

Estimation des inputs et outputs non quantifiés directement analytiquement, utilisés aux tableaux 29, 30 et 31 pages 217, 219 et 222.

---

(1) Fixation symbiotique de N_2 dans la biomasse racinaire (NFix - NdfFix)

Pour l'arachide on se reportera au paragraphe 4 de l'annexe 36 A où les valeurs de 60% et 45% de NdfFix sont estimées pour les systèmes, respectivement, traditionnels et améliorés. Une autre estimation de cet input est donné par application de l'équation 2 (page 49) à l'essai X dans lequel nous avons mesuré No et Nt (les calculs ne sont pas reproduits ici) ; cet input, exprimé en % de NdfFix, est estimé à 14% pour le soja (soja 1) et 38% pour l'arachide (GANRY et GUIRAUD, résultats non publiés). On remarquera la similitude des deux estimations pour l'arachide, à savoir 45% et 38% dont la supériorité pour l'arachide au champ est cohérente du fait de la prise en compte des défiolations.

(2) Fixation asymbiotique et libre de N2 (Nfix dans le système sol-plante et Ndffix dans les parties aériennes)

Dans les systèmes culturaux étudiés, on considère que l'essentiel de la fixation asymbiotique et libre de N_2 se produit au moment de la biodégradation racinaire. En effet, d'une part la fixation de N_2 rhizosphérique est faible en absence d'inoculation (GANRY 1984), d'autre part l'essentiel des matières végétales restituées Nr est constitué par les racines des plantes cultivées du fait que pratiquement aucune matière végétale n'est restituée au sol dans les systèmes actuellement pratiqués (ALLARD et al. 1982). Ces racines ont un C/N élevé ($50 < C/N < 75$) et présentent un trés faible pouvoir minéralisateur (GANRY 1977). La biomasse racinaire qui reste dans le sol est en fait la somme :
[exsudats organiques + racines biodégradées en cours de cycle + racines visibles à la récolte].
SAUERBECK et al. (1982) ont montré, grâce à des études avec marquage avec carbone radio-actif, que cette biomasse racinaire équivaut, dans le cas du mil, à 2,5 fois le poids des racines visibles à la récolte, laquelle biomasse racinaire correspond à 20-40% de la plante annuelle. En absence de résultats pour les autres plantes, nous admettrons le rapport moyen de 2,5 pour l'ensemble des plantes étudiées :
mil, arachide, soja et maïs.

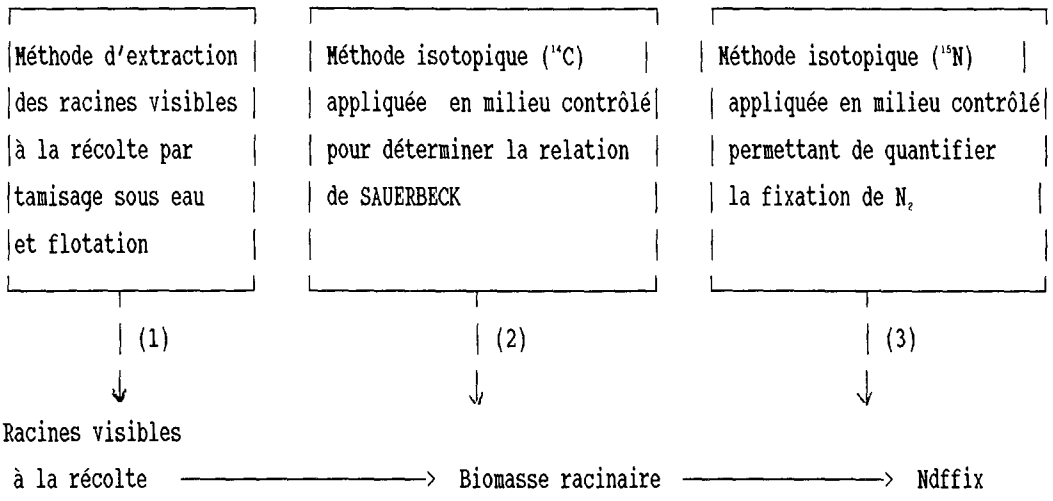
Au champ, CHARREAU et TOURTE (1967) ont estimé dans l'horizon cultivé, le poids des racines d'un mil souna et d'une arachide. Pour le mil, ce poids est respectivement pour une culture traditionnelle et une culture améliorée, de 0,8 t ha^{-1} et 1,5 t ha^{-1}, correspondant à un rapport racines/parties aériennes de 0,11 et 0,15, soit, aprés transformation, une biomasse racinaire de 2,0 et 3,5 t ha^{-1}. Pour l'arachide, en culture traditonnelle et améliorée, la biomasse racinaire est respectivement de 1,5 et 2,5 t ha^{-1} (rapport racines/parties aériennes de 0,32 et 0,19). Pour le maïs, on trouve à Séfa une biomasse racinaire dans

Tableau 37 A (suite)

l'horizon 0-30 cm de 3,0 t ha^{-1} (rapport racines/parties aériennes = 0,20) (GANRY 1987 non publié). Pour le soja, en absence de données expérimentales, nous admettrons une biomasse racinaire de 3,0 t ha^{-1} (rapport racines/parties aériennes = 0,22).

Une expérience en vase de végétation nous a permis d'établir qu'approximativement l'enfouissement de 1 g de racine (mil en l'occurrence) induit une fixation de N_2 dans les parties aériennes de 1,2 mg d'azote (GANRY 1984).

Le cheminement de notre calcul est donc le suivant :



L'application des méthodes (1), (2) et (3) est nécessaire à l'évaluation de la biomasse racinaire et de Ndffix (N_2 fixé asymbiotiquement dans les parties aériennes) in situ.

Nos estimations de la fixation asymbiotique de N2 sont de l'ordre de 2 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} en système de culture traditionnelle mil-arachide et 7 kg N ha^{-1} 2 ans^{-1} en système de culture amélioré mil-arachide et maïs-soja.

L'utilisation d'un rapport racines/parties aériennes a priori lié à l'espèce ou à la variété simplifierait les calculs et surtaout nous affranchirait de la fastidieuse détermination in situ du poids des racines visibles à la récolte. Mais, comme le soulignent STREET et al (1978), si ce rapport est effectivement lié génétiquement à la plante, il varie considérablement sous l'action des facteurs de production et du milieu raison pour laquelle le poids des racines visibles à la récolte nous apparaît le meilleur indicateur, par plante et pour un certain nombre de situations caractérisées par le milieu pédo-climatique et les techniques culturales. Nous avons cité ci-dessus quelques rapports racines/parties aériennes relatifs au mil, au maïs, à l'arachide et au soja.

Tableau 37 A (suite)

(3) Précipitations (Np)

Parmi les auteurs qui ont mesuré les apports d'azote par les pluies en régions semi-arides à une saison des pluies (jusqu'à 1300 mm), seuls JONES et BROMFIELD (1970) citent des valeurs non négligeables de 4 à 5 kg ha^{-1} an^{-1} pour une pluviométrie de 1200 mm, à Samaru (Nigéria) ; mais WETSELAAR et HUTTON (1963) concluent que ces valeurs ne dépassent pas 1 kg ha^{-1} an^{-1} sous une pluviométrie de 900 mm en Australie et PIERI (1982), au Sénégal, trouve seulement 2 kg ha^{-1} sur 4 années, sous une pluviométrie de 600 mm à 900 mm.

WETSELAAR et GANRY (1982) soulignent la nécessité de prendre en compte à l'échelle régionale les apports atmosphériques de particules sèches dus aux vents chargés de poussières et aux aérosols, et par la même d'appréhender leurs conséquences sur l'érosion ; par ailleurs, l'analyse des eaux de pluies doit porter sur l'azote total.

Nous avons retenu les valeurs mesurées par PIERI (1982). Cet input est trés faible et de loin inférieur à l'incertitude commise sur les autres inputs.

(4) Pertes par lixiviation (Nl)

Dans le système de culture de Thilmakha (tableau 29a) ces pertes sont incluses dans les pertes totales calculées d'aprés l'équation 10 page 52.

Dans le système de culture de Bambey, on utilise les valeurs citées par PIERI (1985) correspondant une pluviométrie semblable.

Pour le système de culture de Séfa, en l'absence de mesures de lixiviation, on utilise les valeurs citées par PIERI (1985) concernant le maïs, majorées proportionnellement à la pluviométrie.

(5) Pertes par dénitrification et volatilisation (Nv)

Dans le système de culture de Thilmakha (tableau 29) ces pertes sont incluses dans les pertes totales calculées d'aprés l'équation 10 page 52.

Ces pertes se produisent essentiellement sous forme de dénitrification biologique, favorisée par les fortes températures et l'hygropériodisme, favorisée également par les enfouissements de matière organique.

Pour estimer les pertes par dénitrification, il importe d'une part d'évaluer la nitrification (mais nous ne pouvons évaluer que la nitrification nette) et d'autre part d'évaluer les apports organiques, source d'azote minéralisable proportionnellement à leur C/N, mais aussi support de la dénitrification biologique (substances donatrices d'électrons).

Tableau 37 A (suite)

La nitrification nette est importante en première phase (30 à 50 jours) du cycle pluviométrique durant laquelle des quantités variables d'azote nitrique apparaissent dans l'ensemble du profil. A Bambey, en moyenne sur 4 ans, 60 kg N ha^{-1} sont mesurés, variant de 100 kg ha^{-1} en année sèche (1966) à 25 kg ha^{-1} en année très humide (1967) ; à Séfa, une valeur moyenne de 150 kg N ha^{-1} est trouvée, réduite sous maïs dont le N total atteint des valeurs importantes (BLONDEL 1971).

La minéralisation nette de l'azote à partir des résidus végétaux a été évaluée dans une expérience antérieure en lysimètres (GANRY 1977), respectivement à 3%, 16%, 25% et 41% pour les racines de mil, la paille de mil, la paille de mil compostée et la paille d'arachide. La production d'azote nitrique peut donc varier énormément en fonction du résidu. Pour le système de culture arachide-mil de Thilmakha (tableau 29), on se reportera au paragraphe 4 ci-dessus pour le calcul des pertes Nv. Pour le système de culture arachide-mil de Bambey, on évalue les restitutions organiques : (a) pour le mil à 15 kg N ha^{-1} (racines) et 45 kg N ha^{-1} (racines + pailles), (b), pour l'arachide à 15 kg N ha^{-1} (racines + défiolation) et 45 kg N ha^{-1} (racines + pailles). Pour le système de culture soja-maïs de Séfa, on évalue les restitutions organiques (a) pour le maïs à 20 kg N ha^{-1} (racines) et 60 kg N ha^{-1} (racines + pailles), (b) pour le soja de 50 kg N ha^{-1} (racines + pailles). Compte tenu de ces résultats, l'ordre de grandeur de la dénitrification, estimé à 12% de l'azote nitrique (DOMMERGUES et MANGENOT 1970), est le suivant (le pourcentage est appliqué à $N\text{-}NO^-_3$ susceptible d'être minéralisé à partir des résidus végétaux):

	système de culture actuellement pratiqué (tableaux 29a, 30a et 31a)	système de culture intensifié possible (tableaux 29b, 30b et 31b)
	kg N dénitrifié ha^{-1} $2ans^{-1}$	
Arachide-mil à Bambey	15	17
Soja-maïs à Séfa	39	42

(6) Les pertes azote engrais

Les pertes azote engrais sous céréales ont été mesurées au chapitre IV d'aprés l'équation 15 page 54 ; sous légumineuses, ces pertes sont dues essentiellement à la lixiviation en début de cycle et estimées à 15% de l'azote apporté.

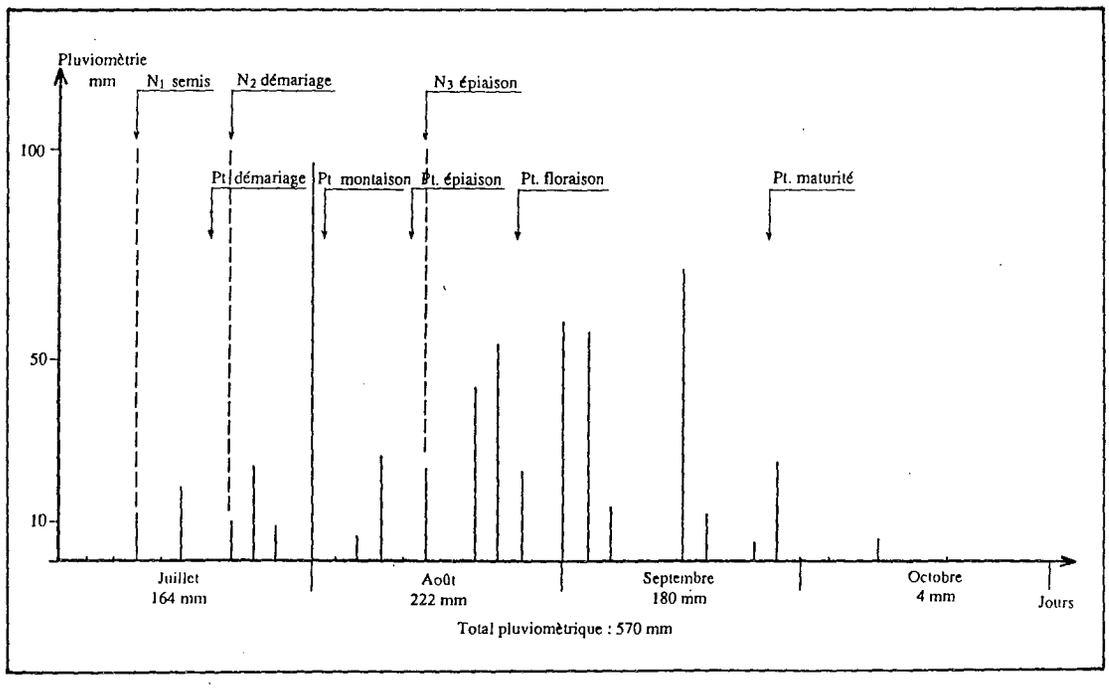


Figure 1 A : Pluviométrie de Bambey en 1975 et cycle végétatif du mil. Pluie cumulée tous les trois jours. Pt = prélèvement de plantes ; N1, N2 et N3 = apport urée marqué avec ^{15}N sur mil. Essai au champ I.

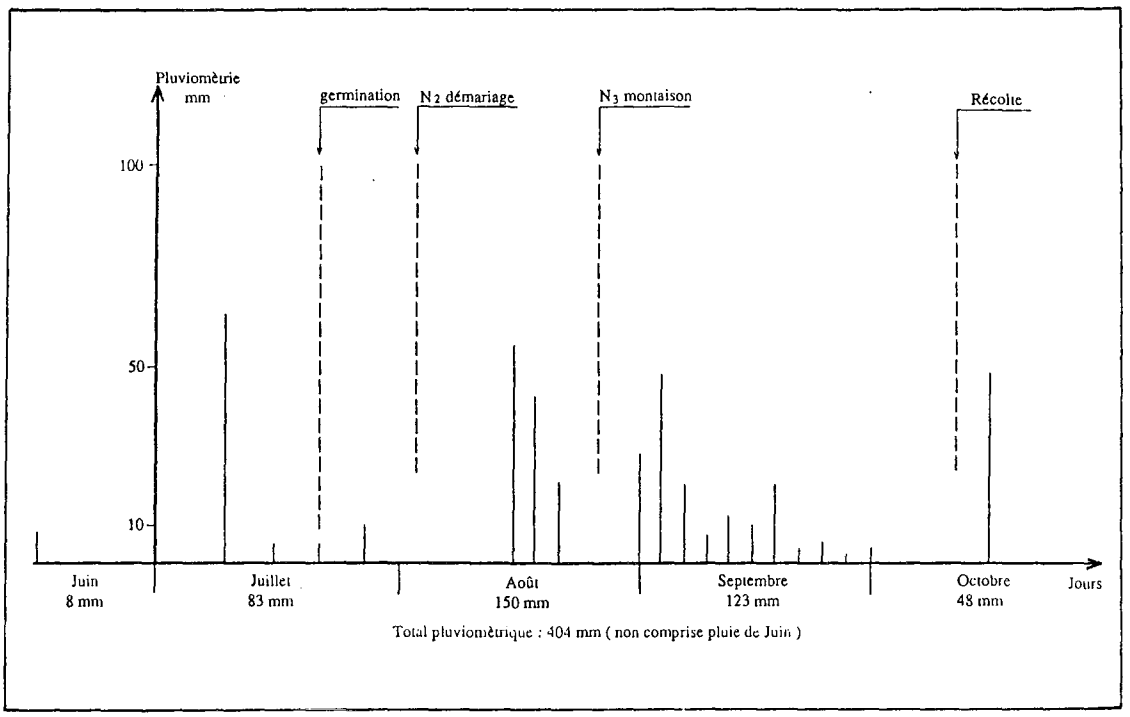


Figure 2 A : Pluviométrie de Bambey en 1977 et cycle végétatif du mil. Pluie cumulée tous les trois jours. N2 et N3 = apport urée marquée avec ^{15}N sur mil. Essai au champ II.

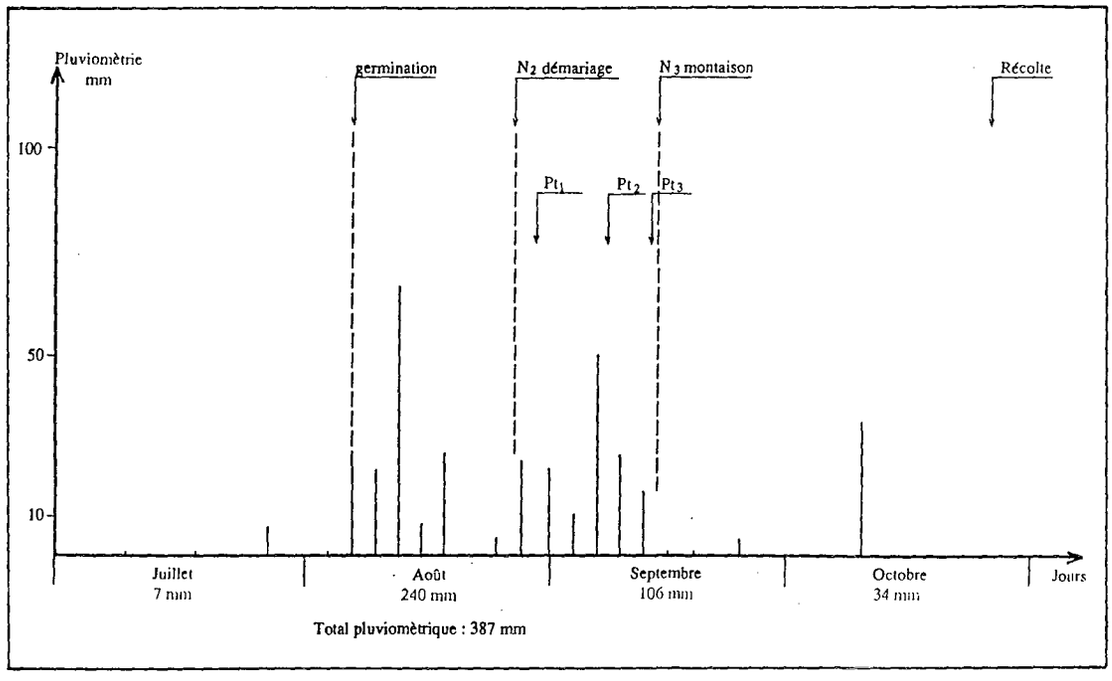


Figure 3 A : Pluviométrie de Bambey en 1980 et cycle végétatif du mil. Pluie cumulée tous les trois jours. Pt = prélèvements de solution du sol. N2 et N3 = apport sulfate marqué avec ^{15}N sur mil. Essai au champ III.

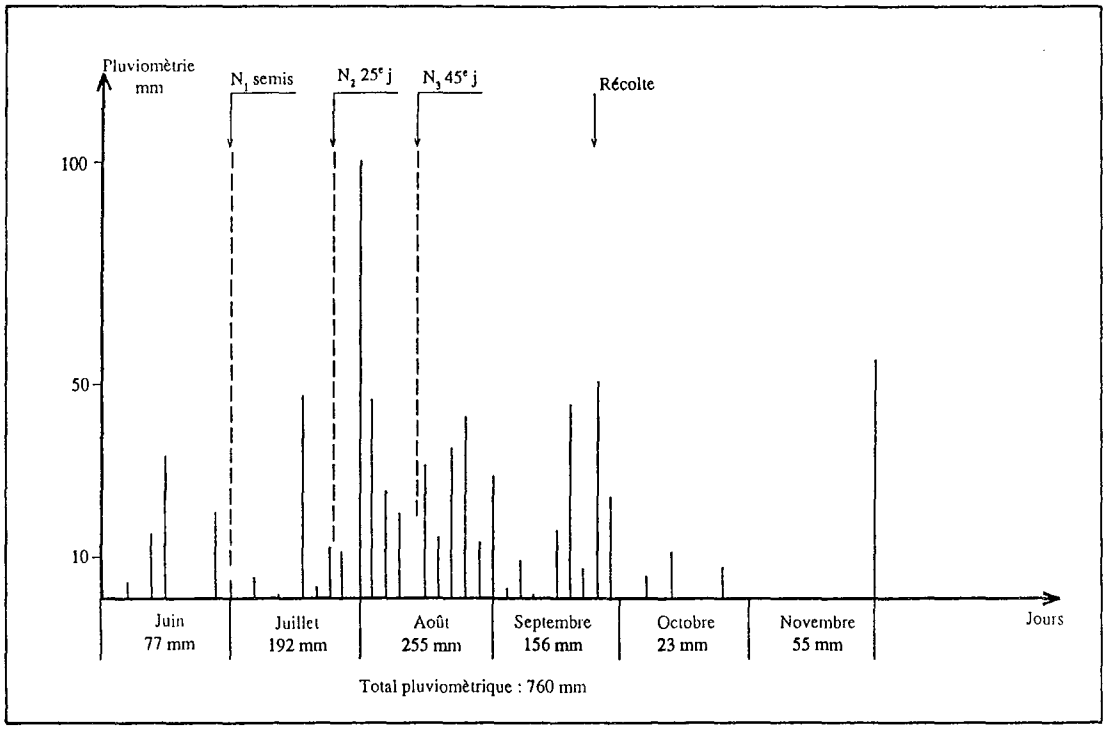


Figure 4 A : Pluviométrie à Nioro en 1978 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N2 et N3 = apport urée marquée avec ^{15}N sur maïs. Essai au champ IV.

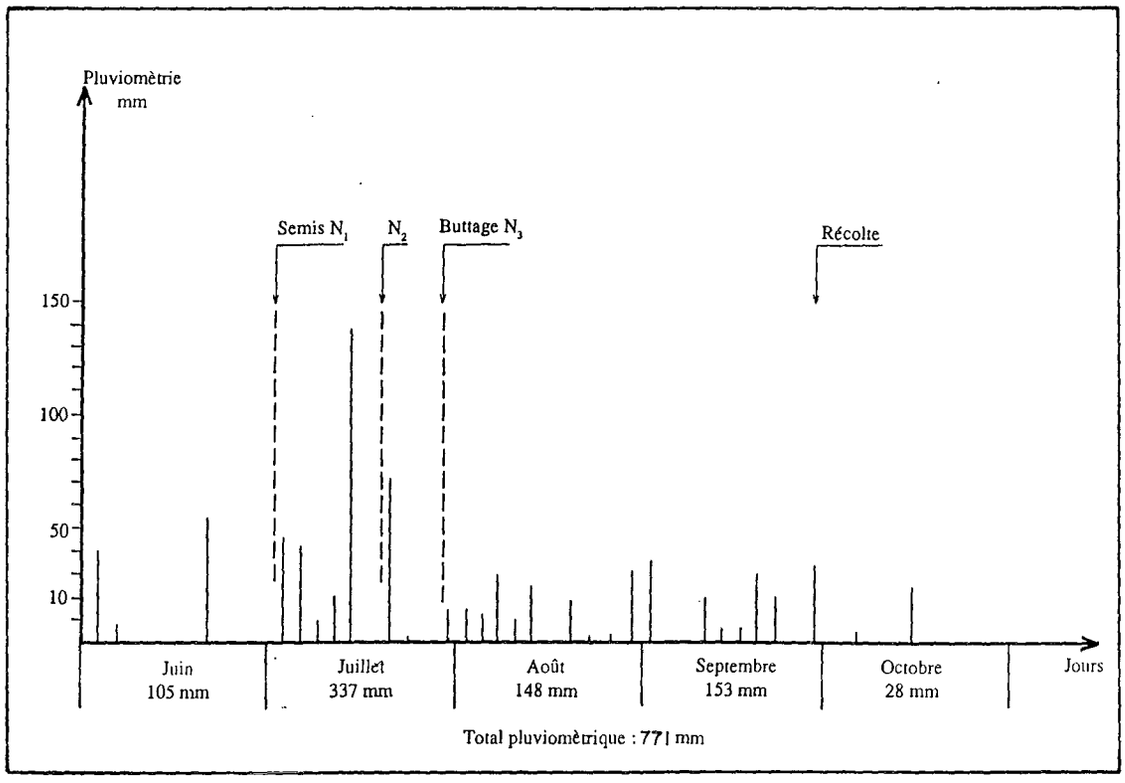


Figure 5 A : Pluviométrie à Séfa en 1983 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N1, N2 et N3 = apport urée marquée ^{15}N sur maïs. Essai au champ V.

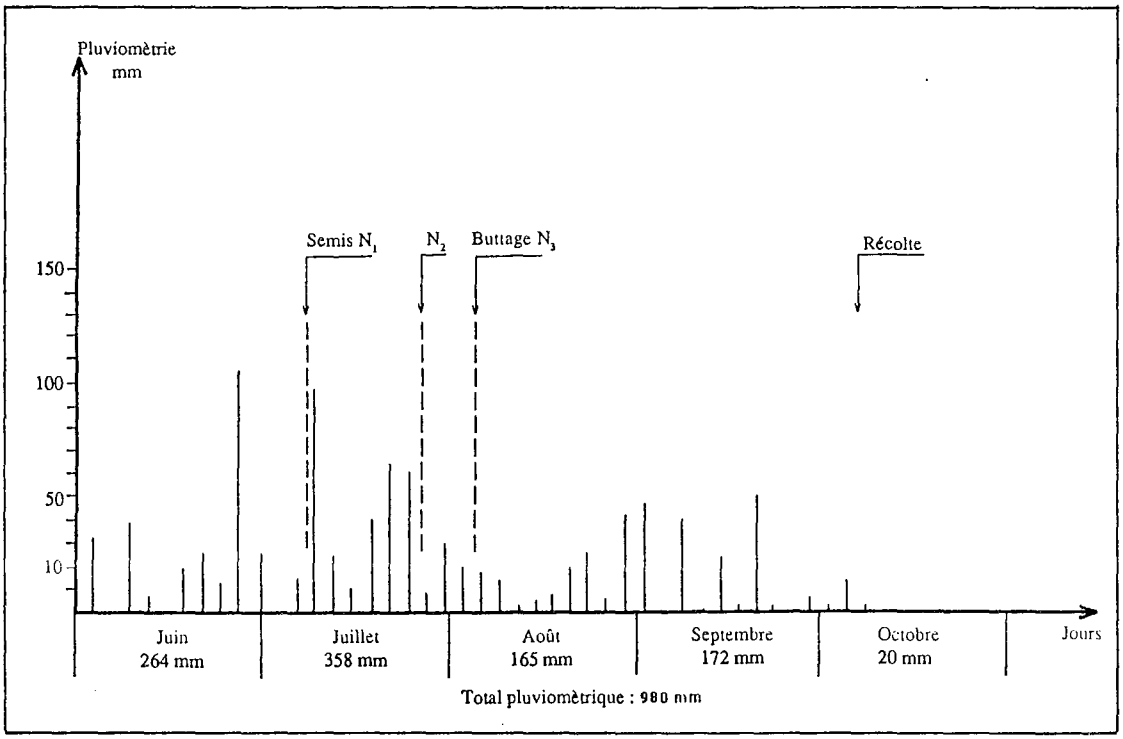


Figure 6 A : Pluviométrie à Séfa en 1984 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N1, N2 et N3 = apports urée marquée ^{15}N sur maïs. Essai au champ V.

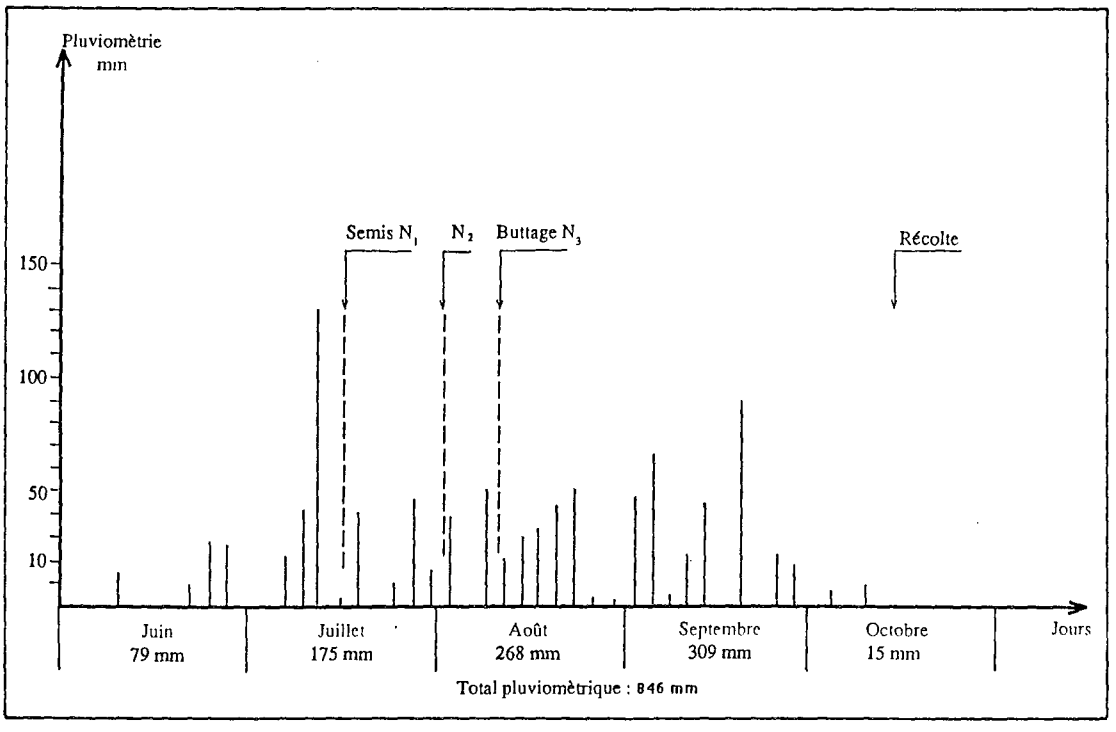


Figure 7 A : Pluviométrie à Séfa en 1985 et cycle végétatif du maïs. Pluie cumulée tous les trois jours. N1, N2 et N3 = apports urée marquée avec ^{15}N sur maïs. Essai au champ VII.

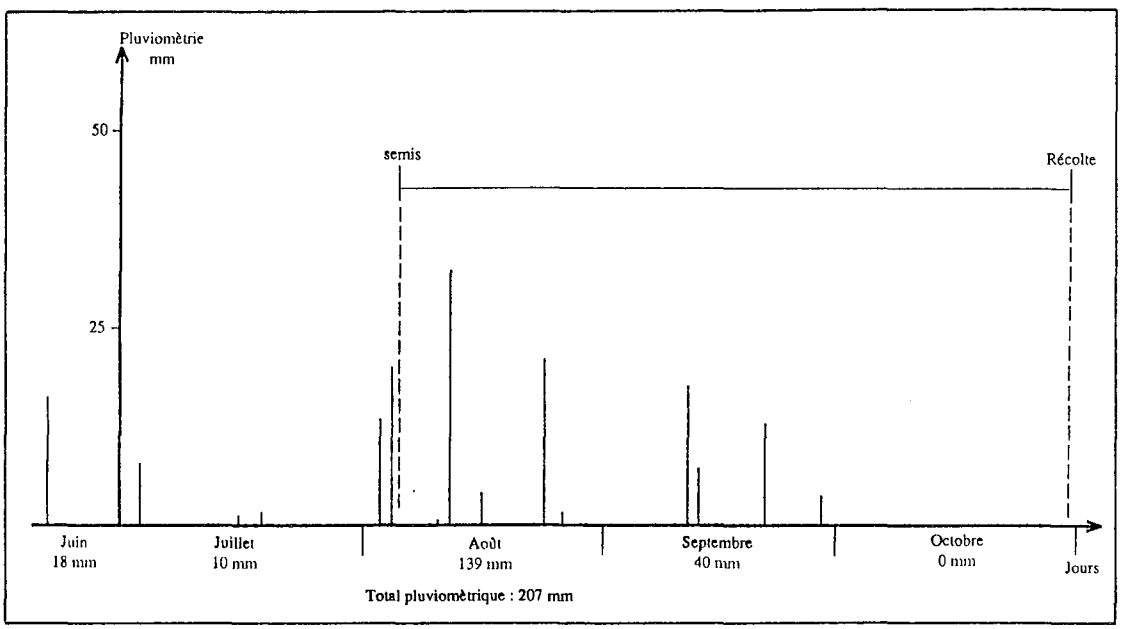


Figure 8 A : Pluviométrie de Thilmakha en 1983 et cycle végétatif de l'arachide. Essai au champ XI.

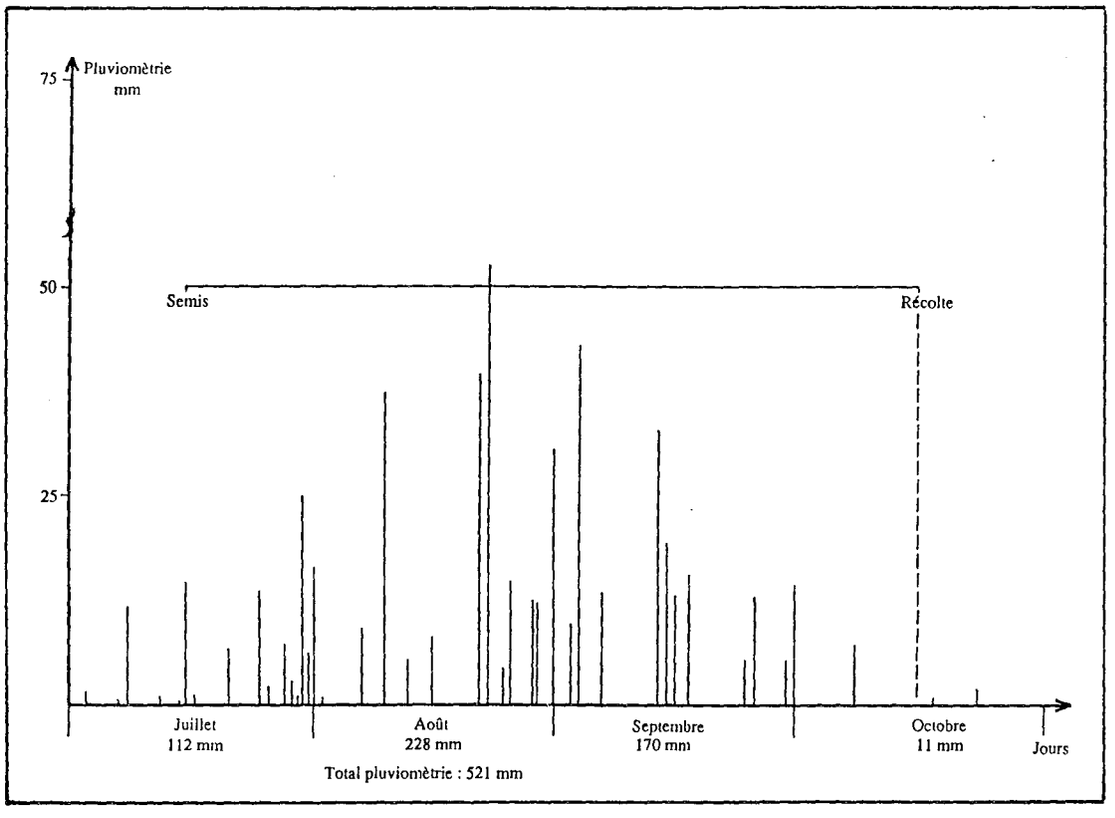


Figure 9 A : Pluviométrie de Bambey en 1975 et cycle végétatif de l'arachide. Essai au champ XIII.

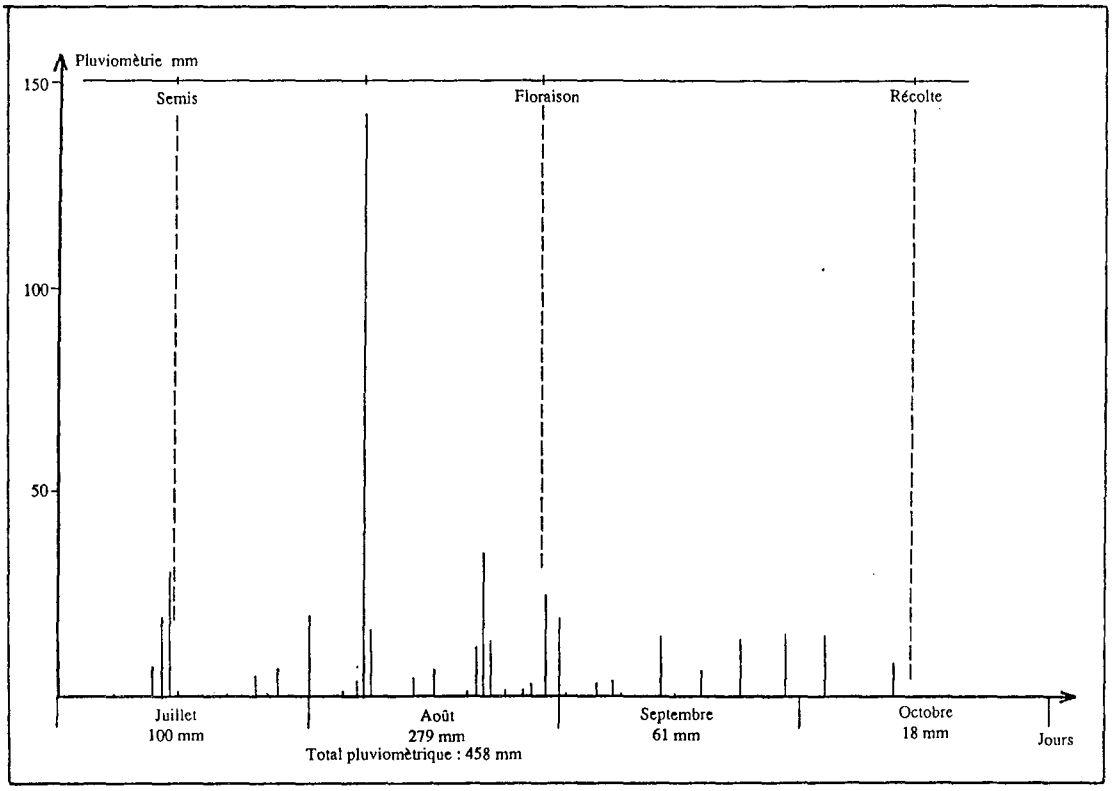


Figure 10 A : Pluviométrie de Bambey en 1974 et cycle végétatif de l'arachide. Essai au champ IX.

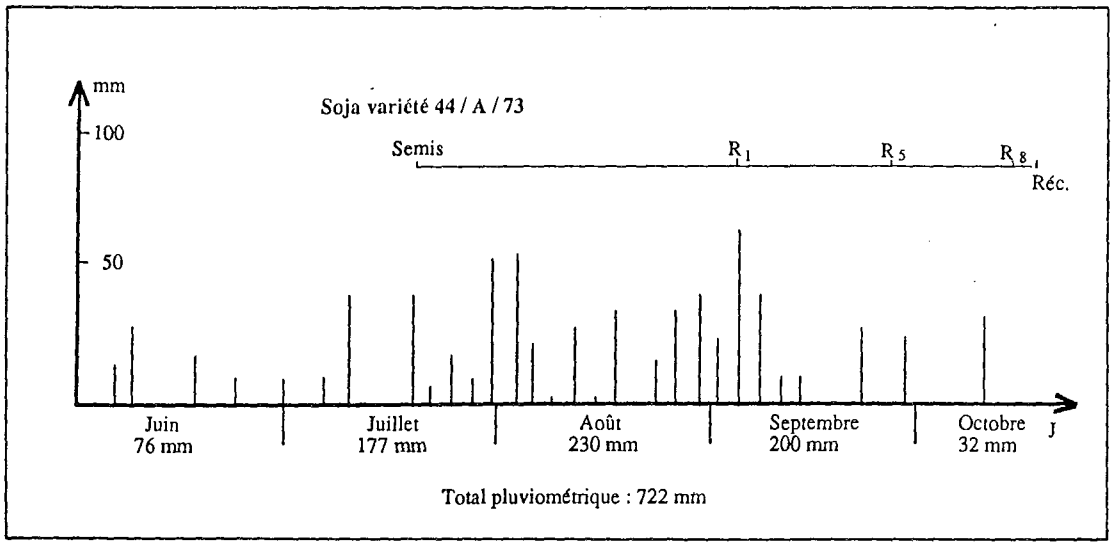


Figure 11 A : Pluviométrie de Séfa en 1980 et cycle végétatif du soja. Pluie cumulée tous les trois jours. Essai au champ XII.

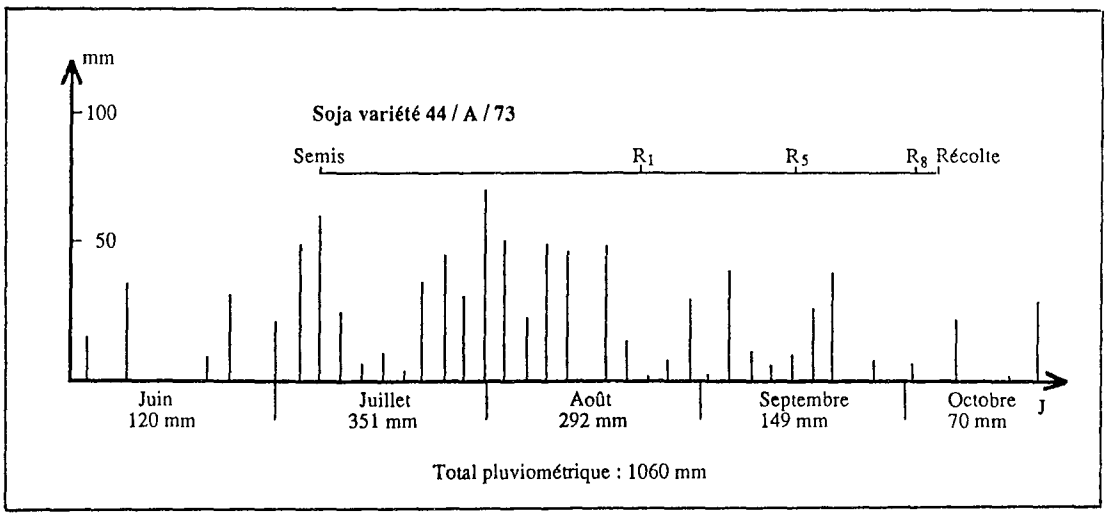


Figure 12 A : Pluviométrie de Séfa en 1981 et cycle végétatif du soja. Pluie cumulée tous les trois jours. Essai au champ VIII.

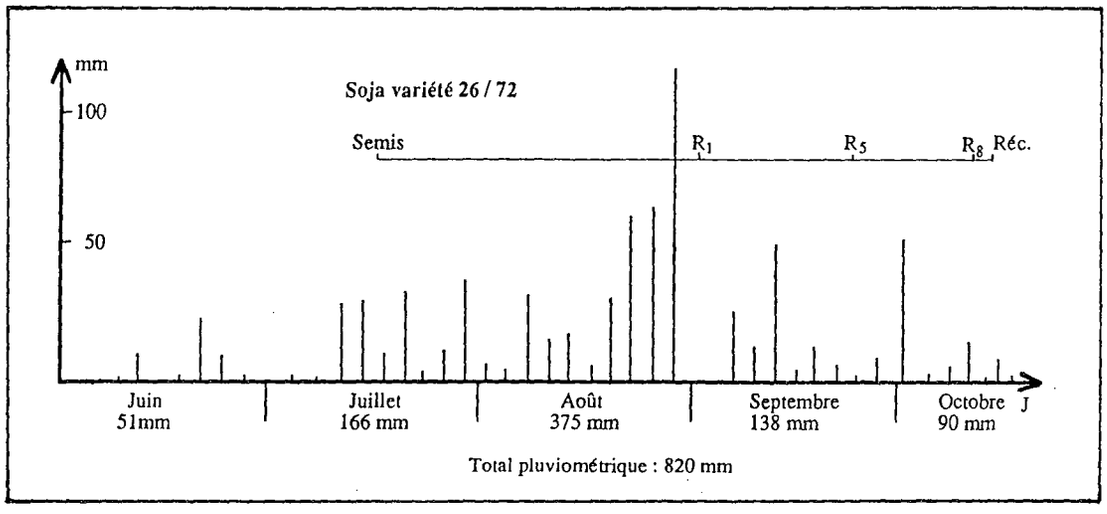


Figure 13 A : Pluviométrie de Séfa en 1982 et cycle végétatif du soja. Pluie cumulée tous les trois jours. Essai au champ XIV.

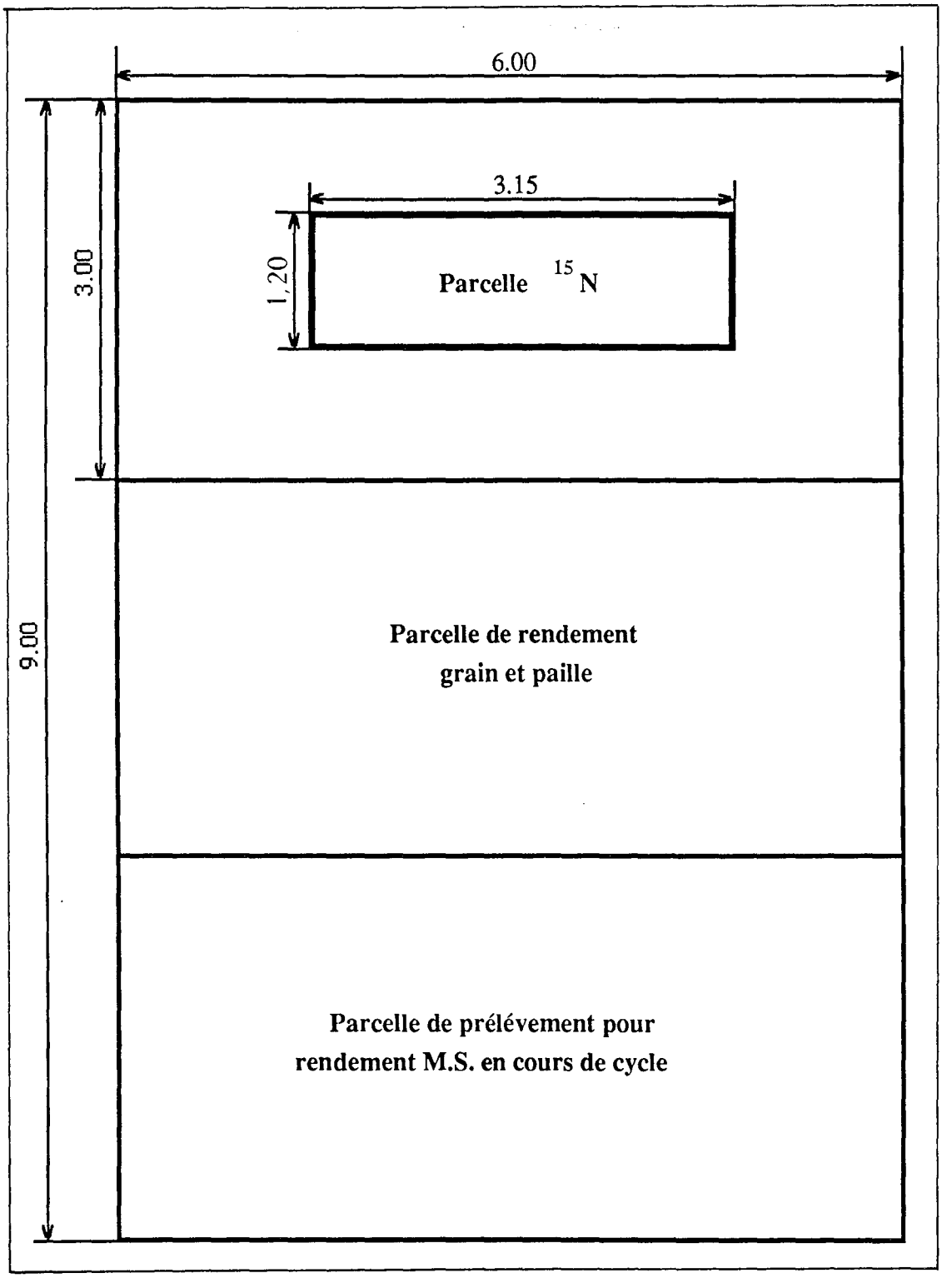


Figure 14 Aa : Plan d'une parcelle principale. Essai aux champ I.

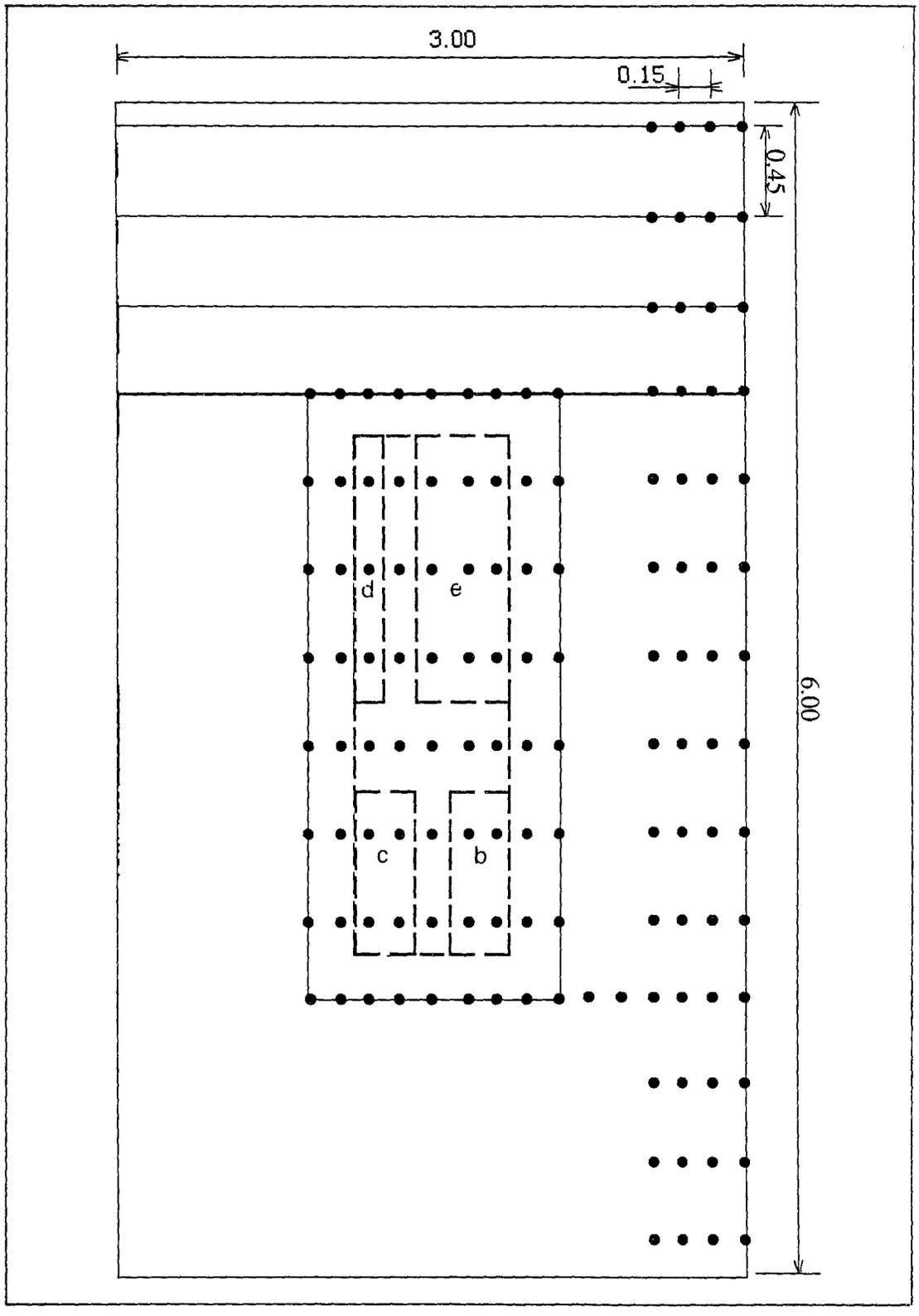


Figure 14 Ab : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ I.

sous-parcelle a = b + c + d + e : prélevée au démariage

sous-parcelle b : prélevée à la montaison

sous-parcelle c : prélevée à l'épiaison

sous-parcelle d : prélevée à la floraison

sous-parcelle e : prélevée à la maturité

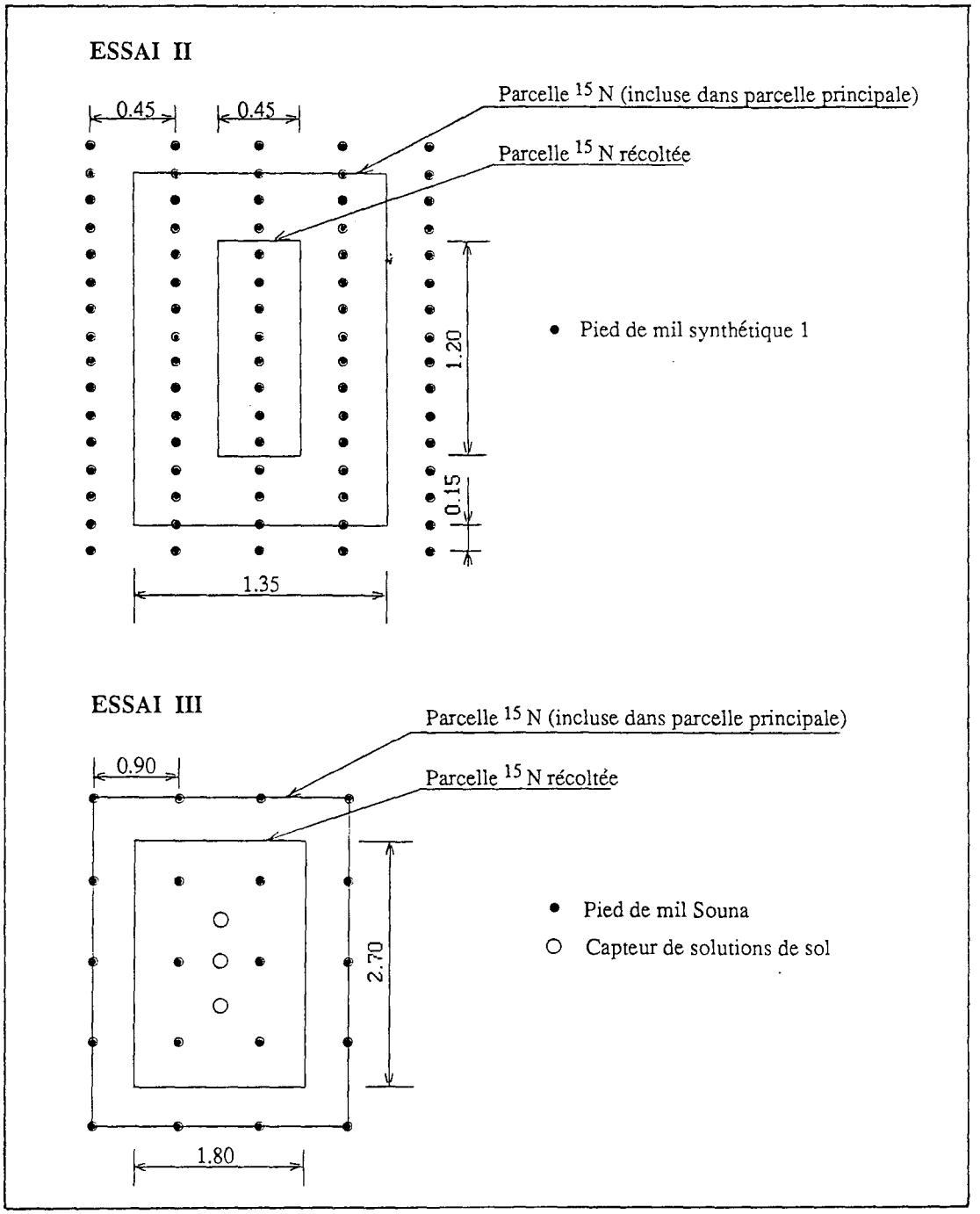


Figure 15 A : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ II et III.

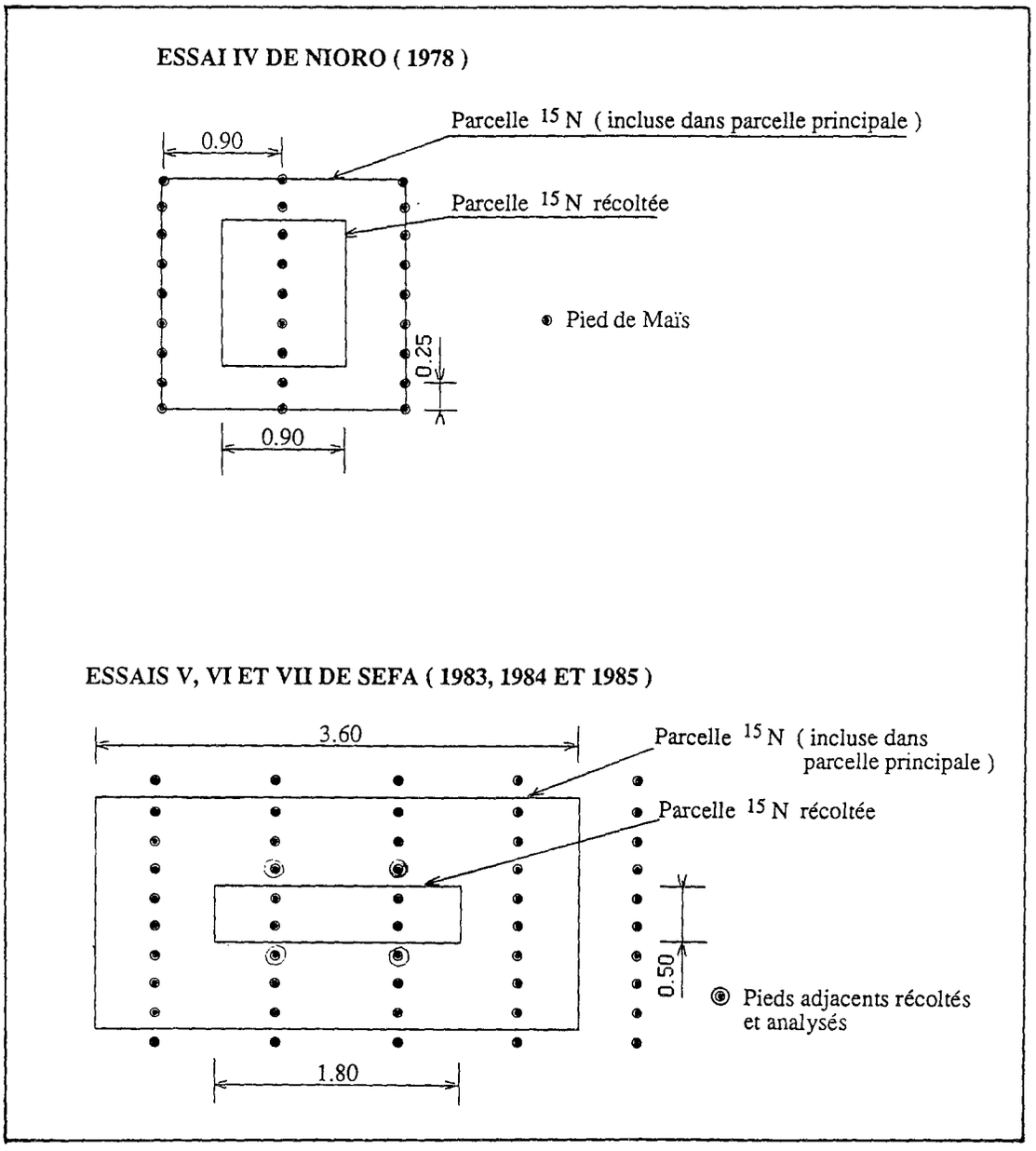


Figure 16 A : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ IV, V, VI et VII.

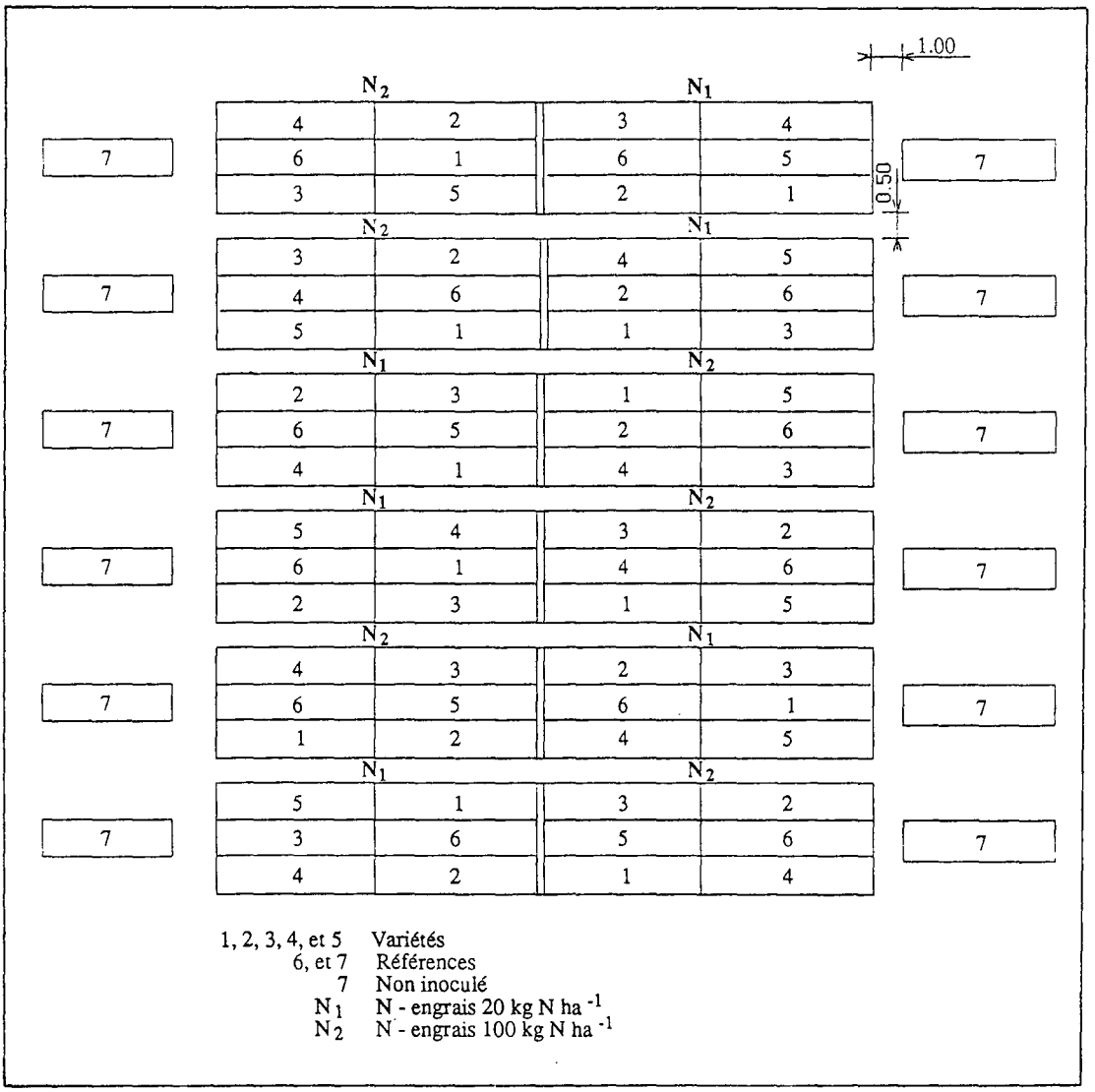


Figure 17 Aa : Dispositif de l'essai azote 15 au champ (cinq variétés de soja et deux cultures de référence à deux niveaux d'azote). Essai au champ VIII.

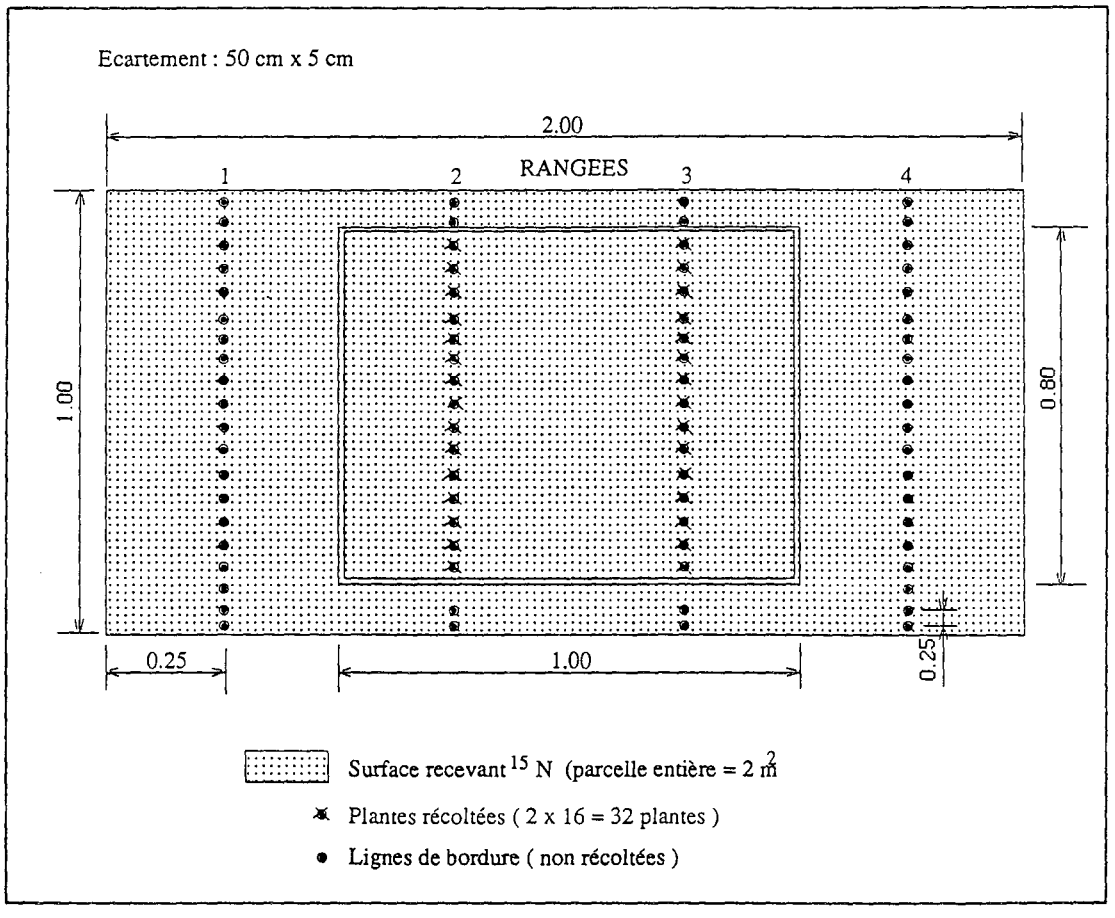


Figure 17 Ab : Plan d'une sous-parcelle azote 15. Essai aux champ VIII.

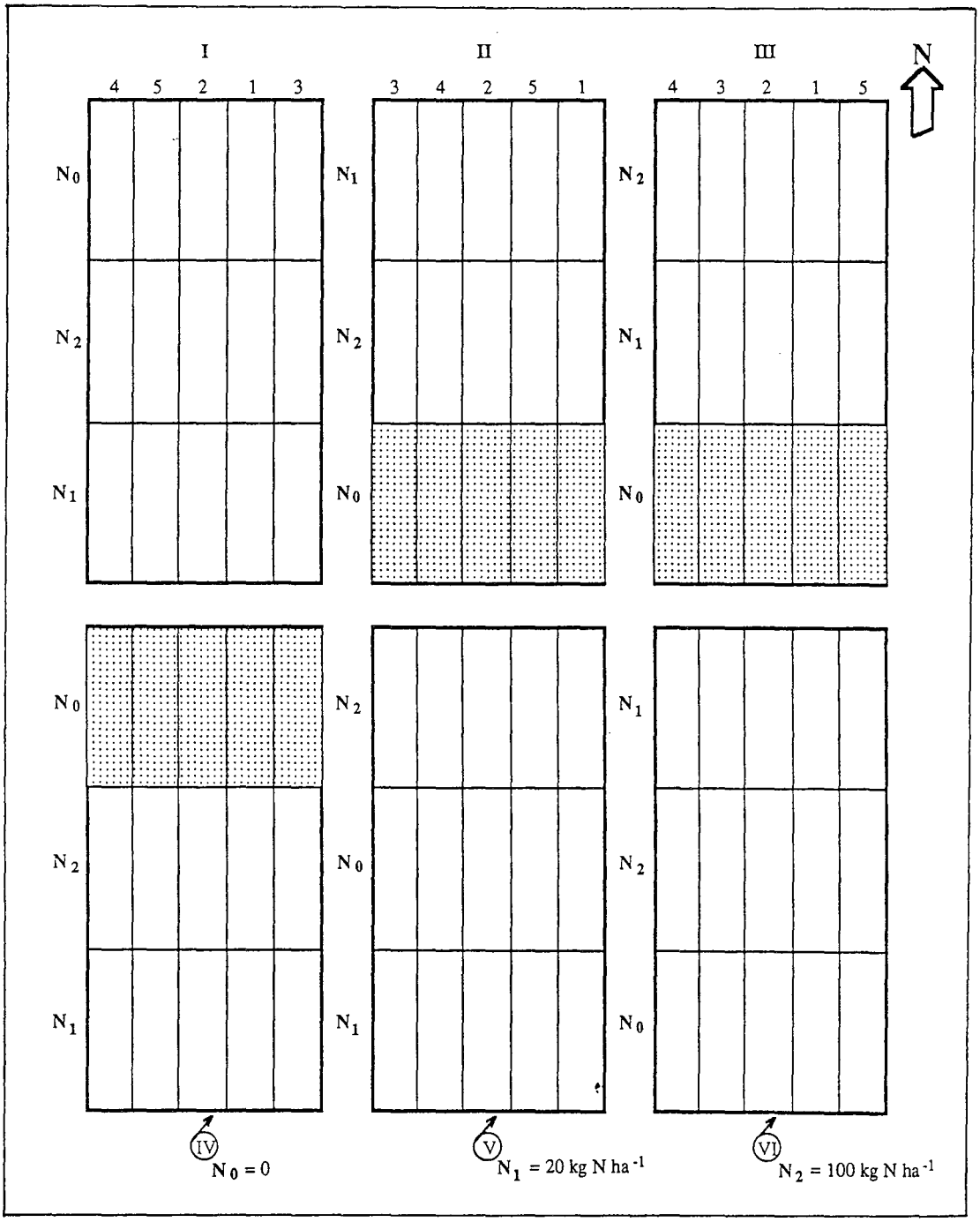


Figure 17 Ac : Dispositif de l'essai rendement (cinq variétés de soja à trois niveaux d'azote). Essai au champ VIII.

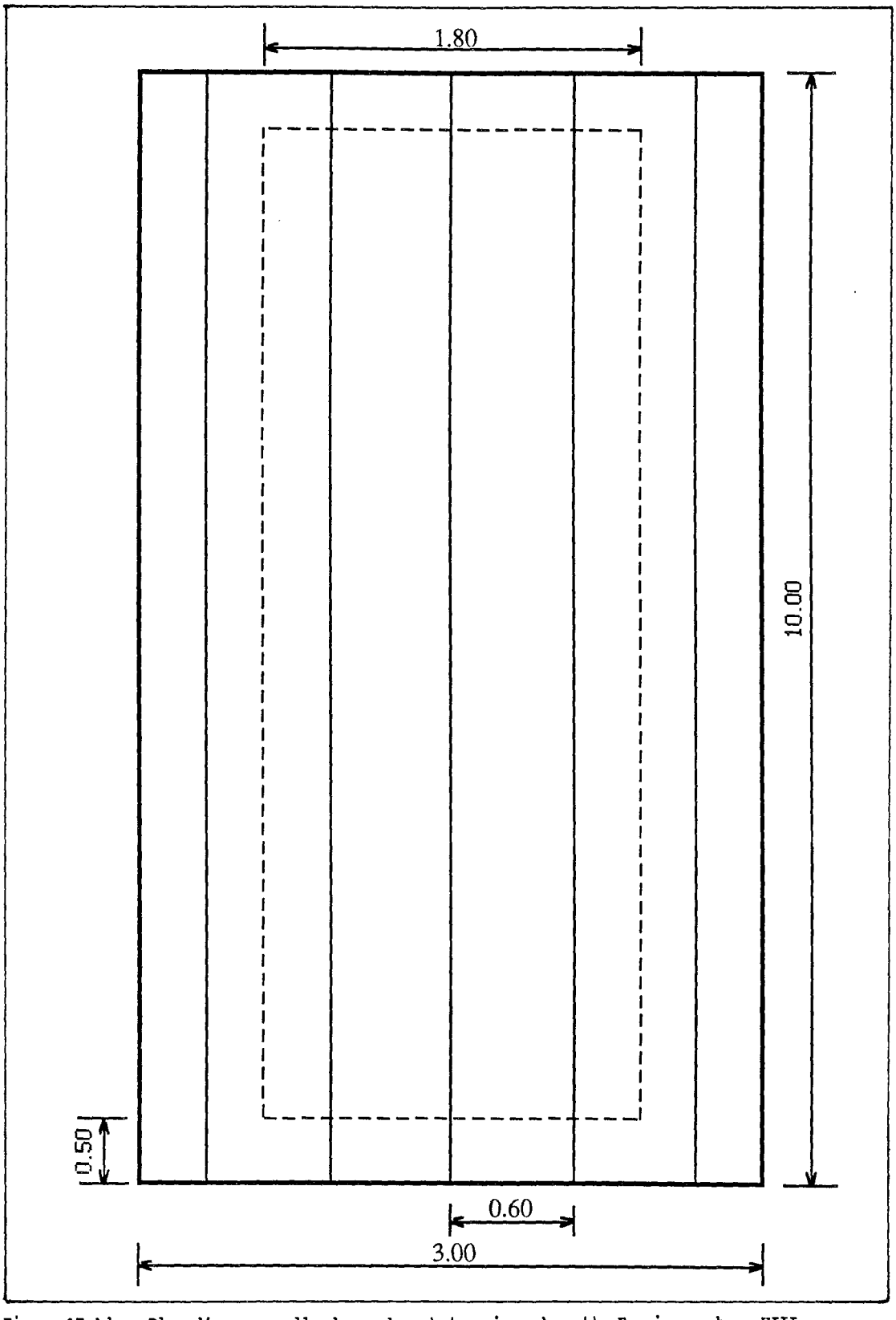


Figure 17 Ad : Plan d'une parcelle de rendement (essai rendement). Essai aux champ VIII.

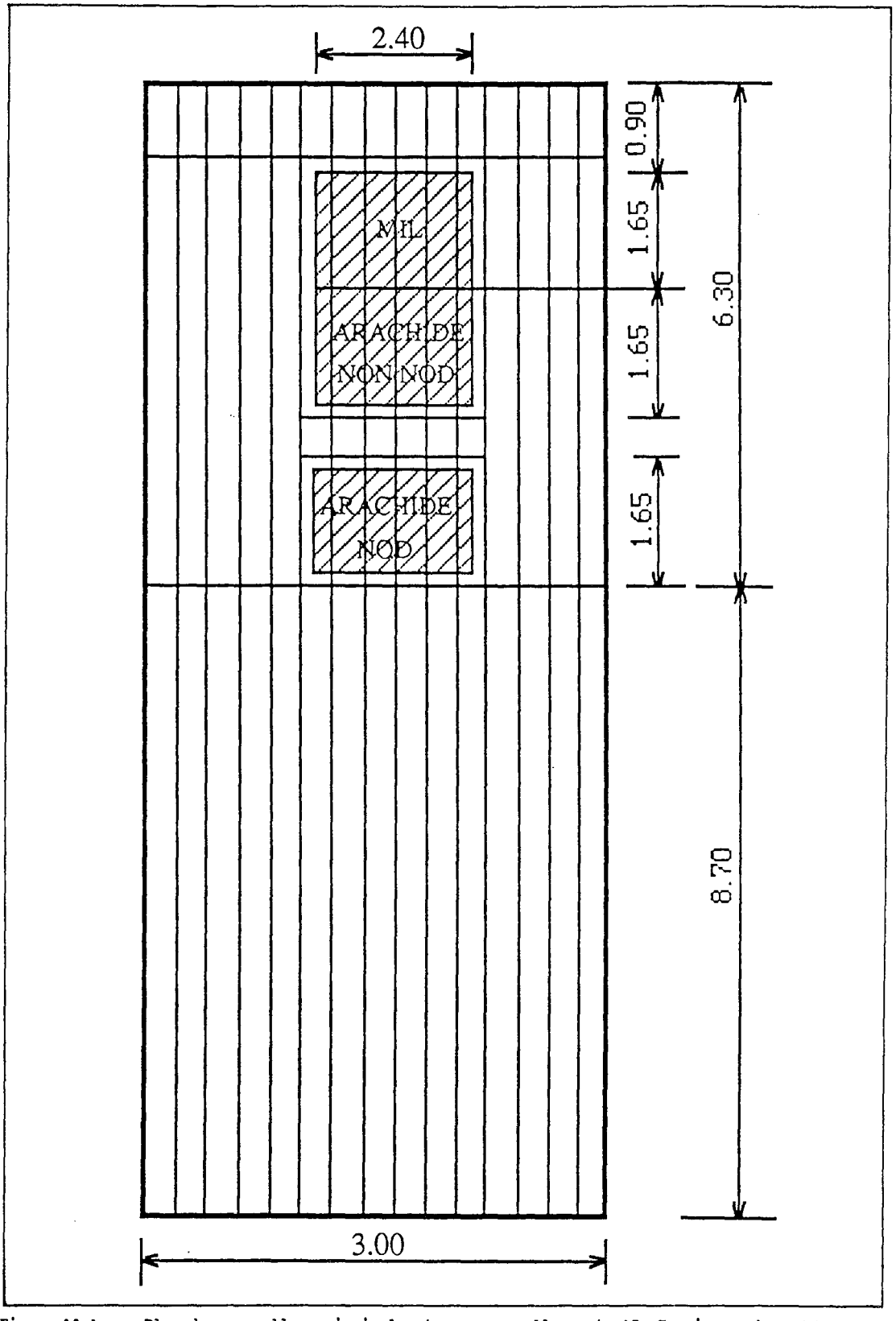


Figure 19 Aa : Plan des parcelle principale et sous-parcelle azote 15. Essai aux champ XI.

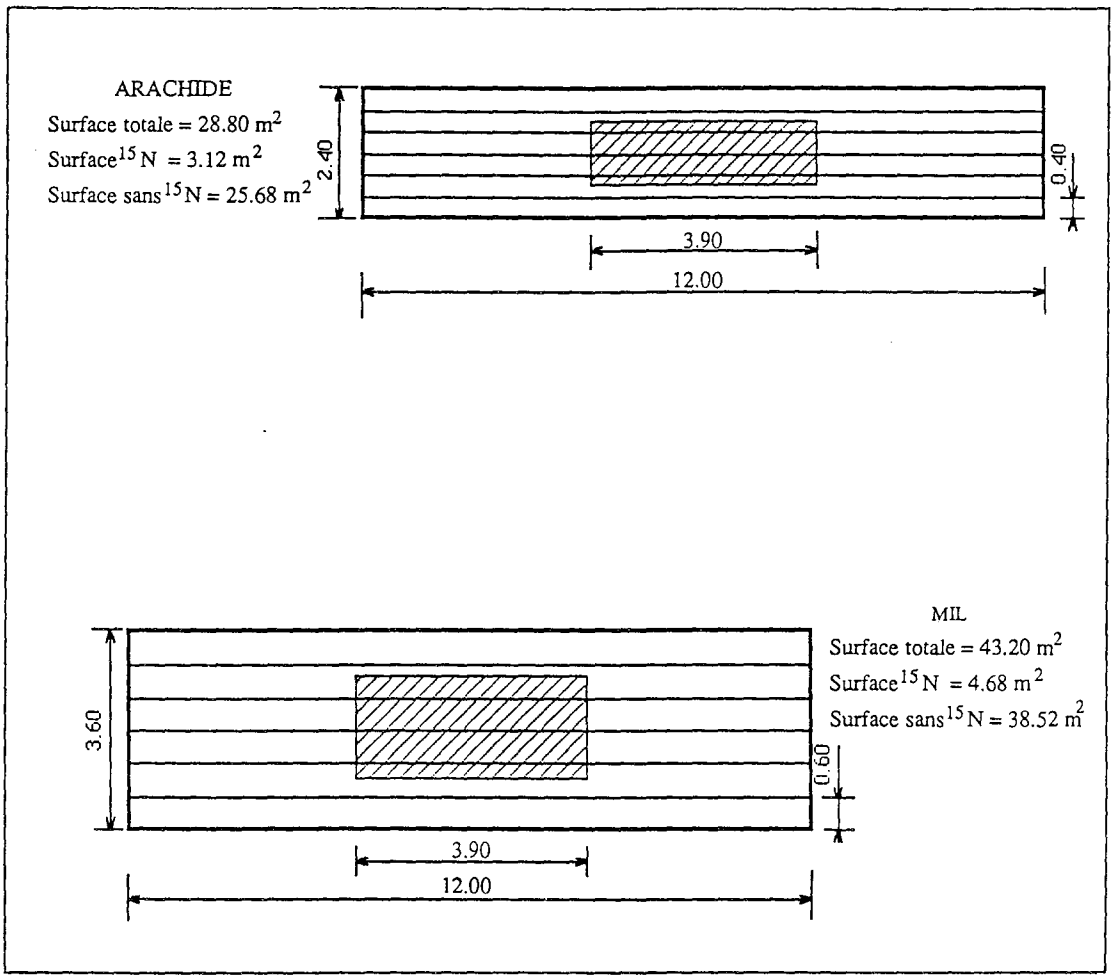


Figure 18 A : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai aux champ IX et XIII.

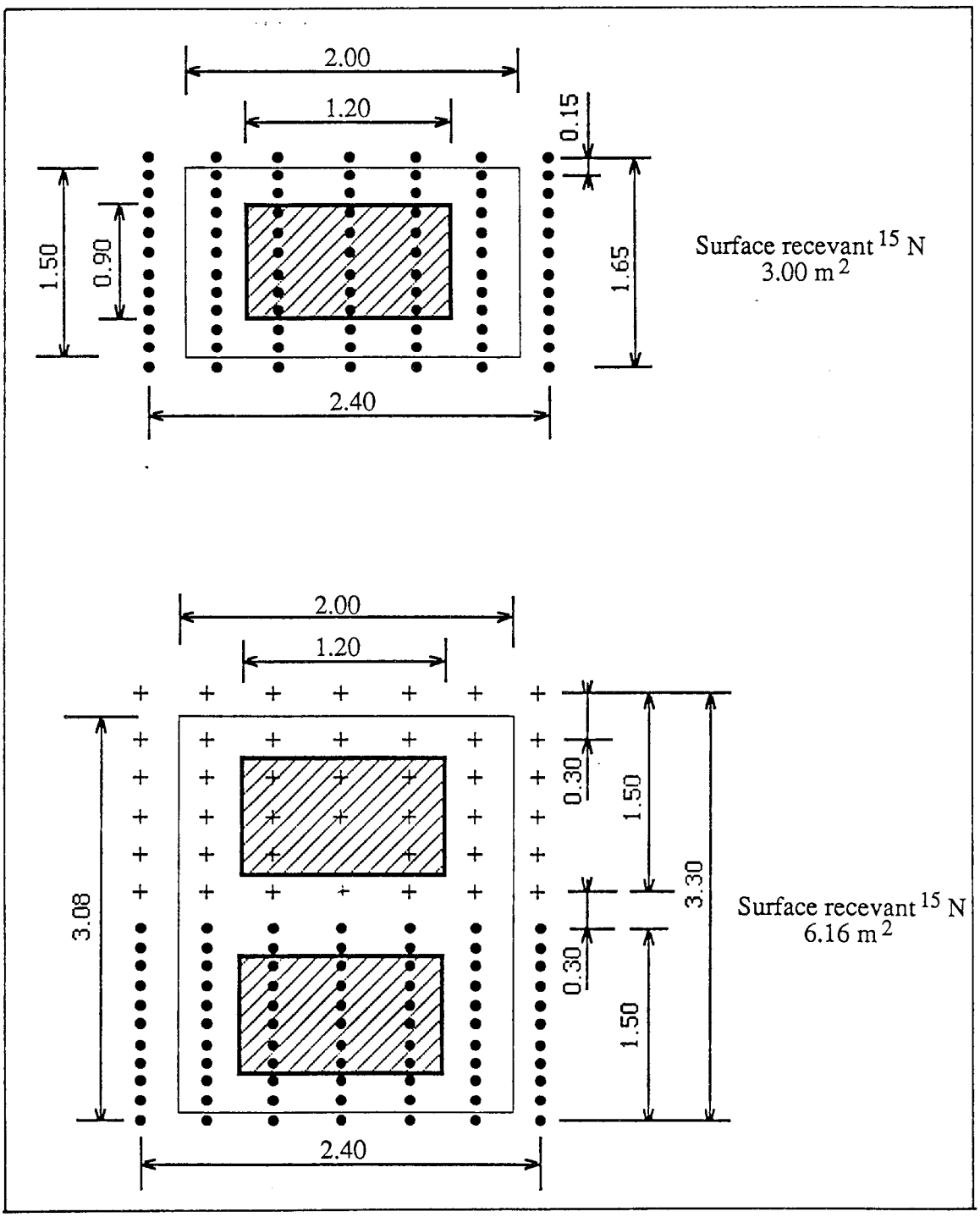


Figure 19 Ab : Plan des sous-parcelles azote 15. Essai au champ XI.

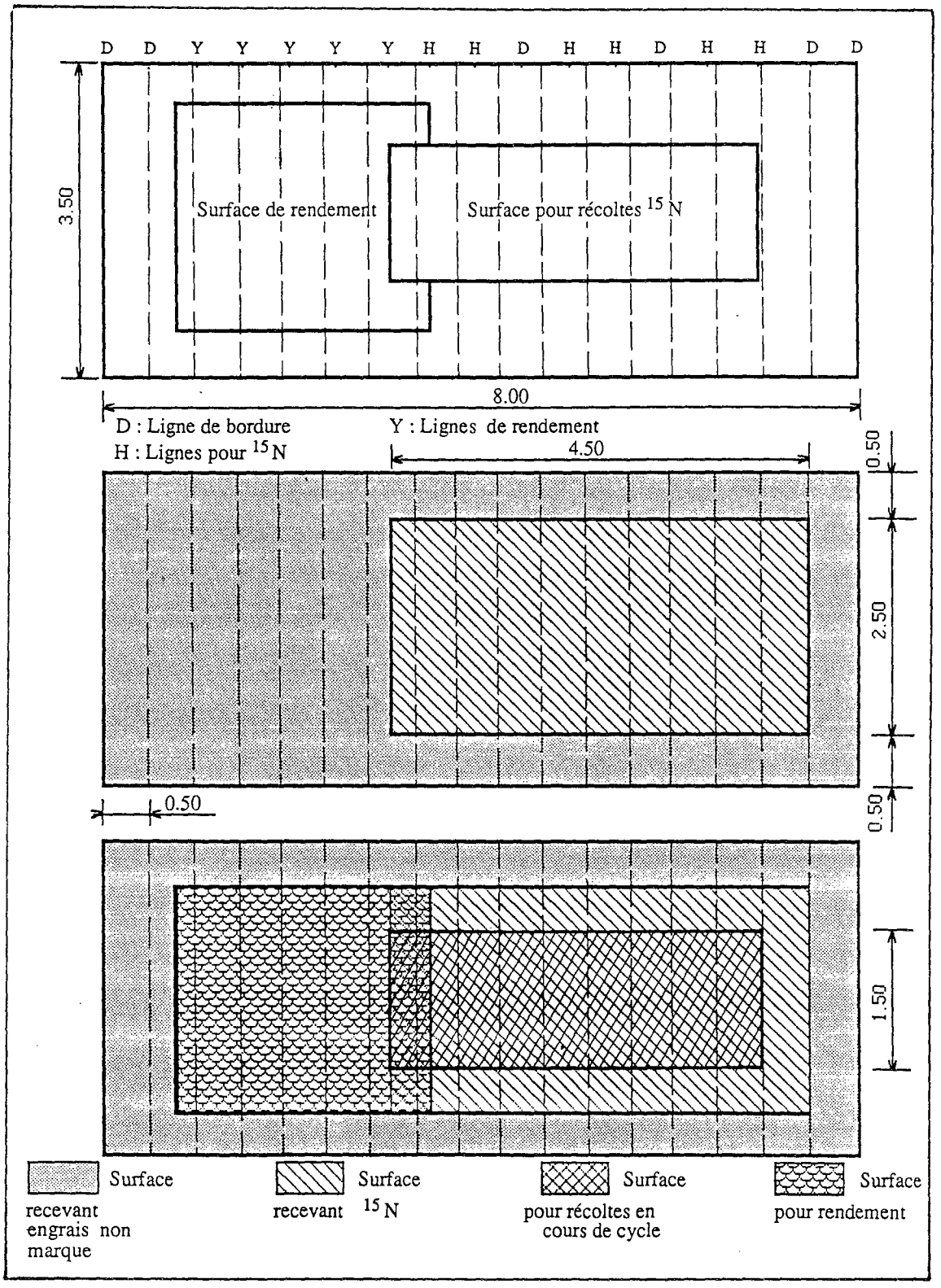


Figure 20 A : Dispositif expérimental de l'essai au champ XII.

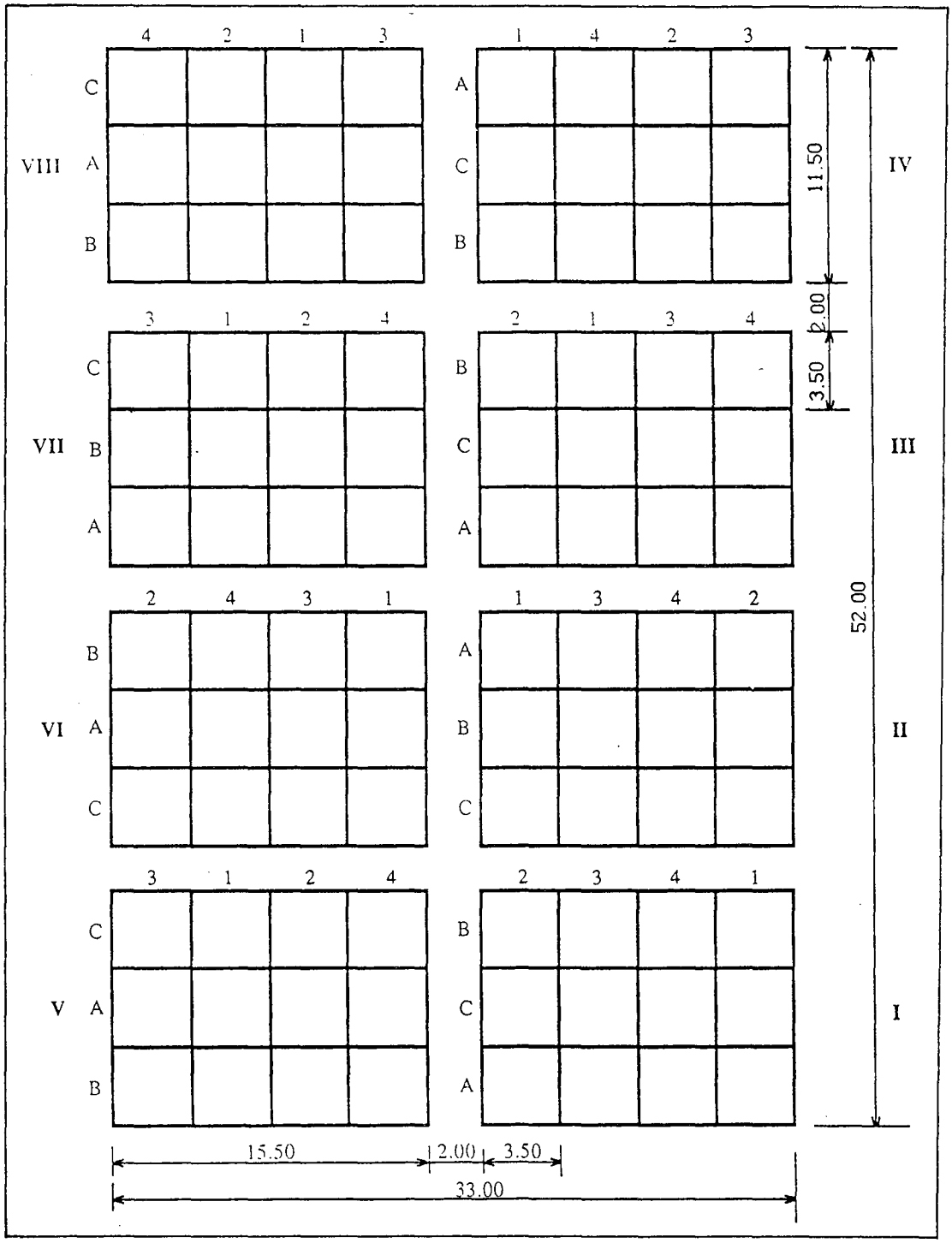


Figure 21 Aa : Plan d'ensemble de l'essai au champ XIV.

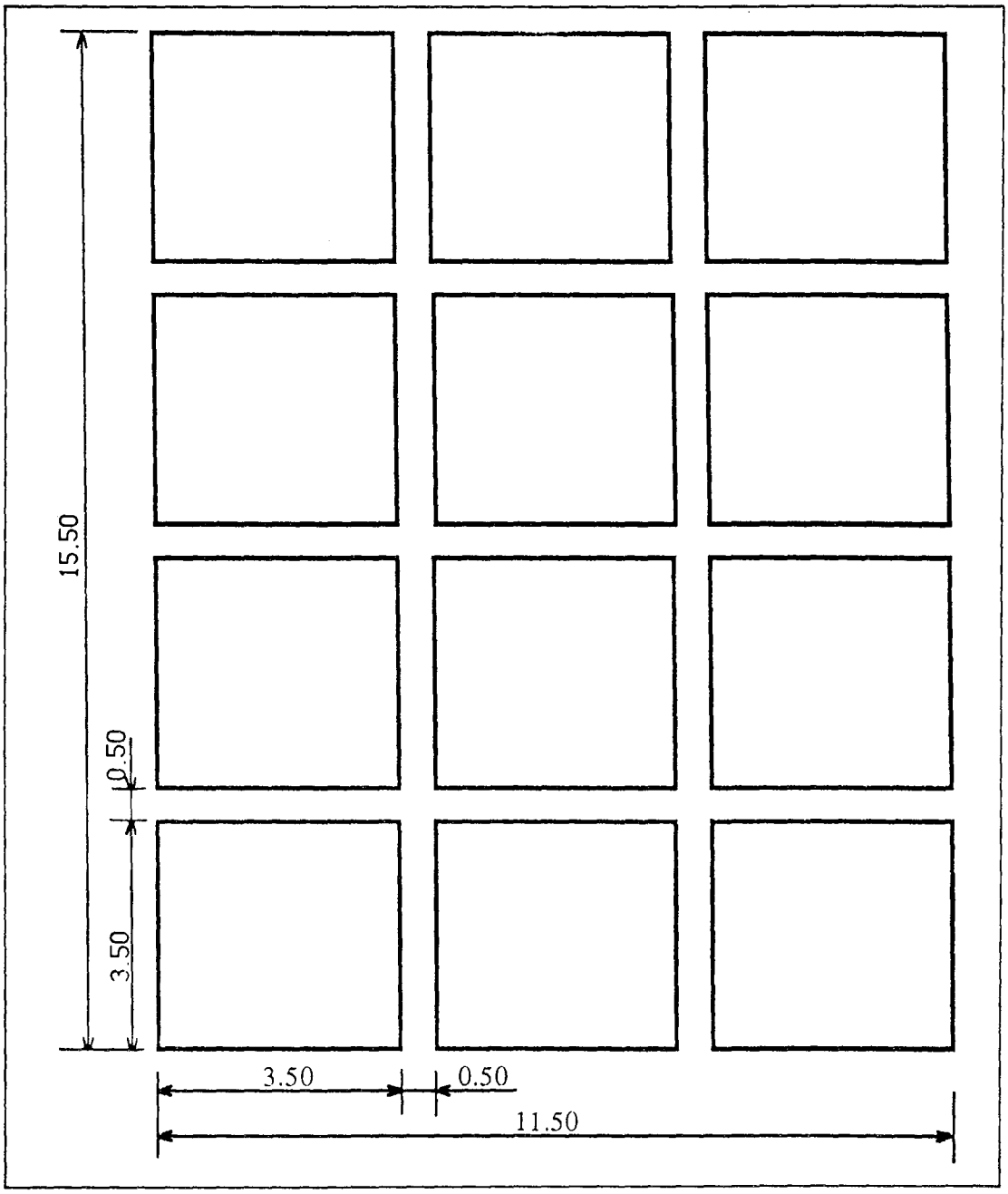


Figure 21 Ab : Plan d'une parcelle principale. Essai au champ XIV.

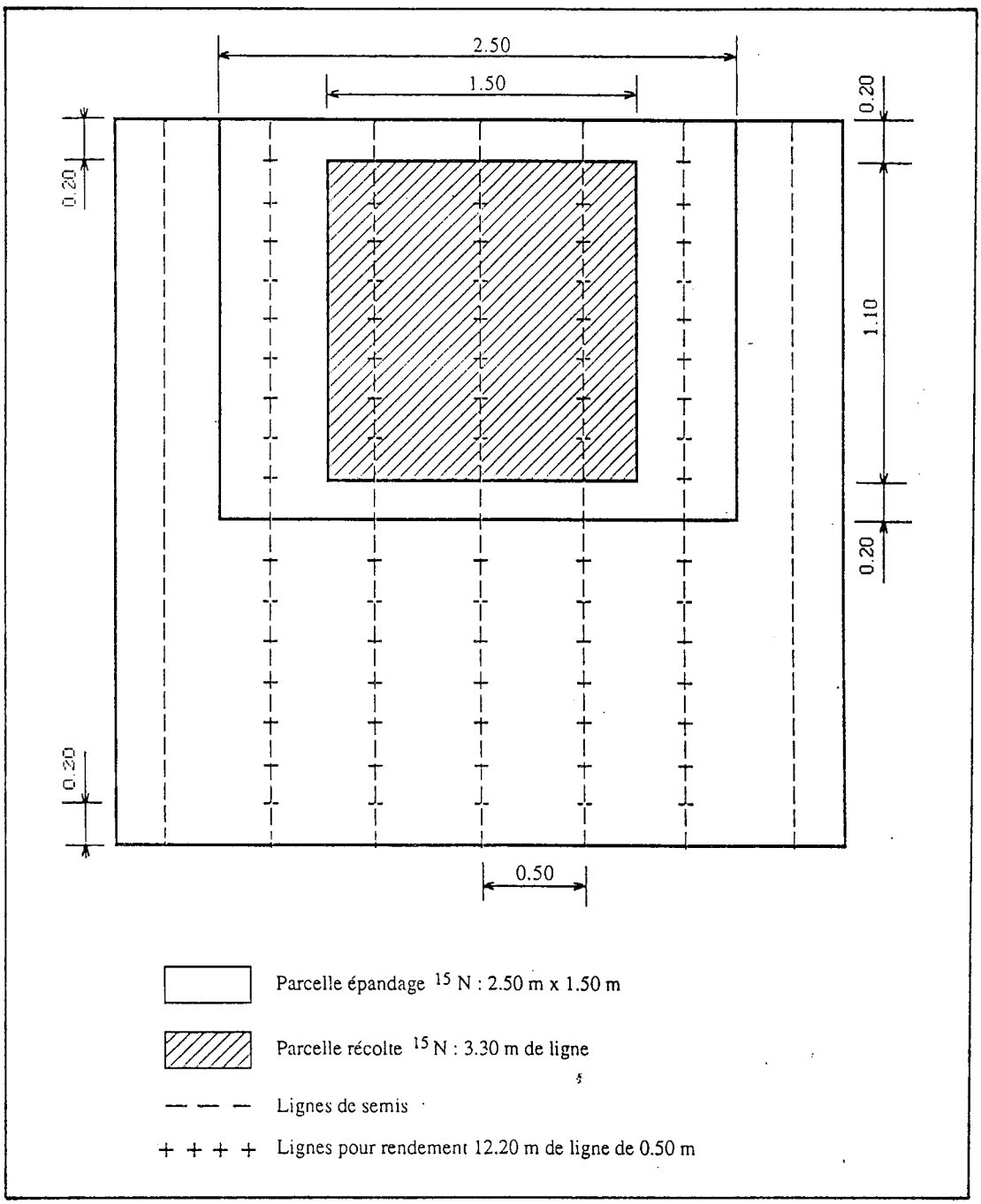


Figure 21 Ac : Plan d'une sous-parcelle. Essai au champ XIV.

RESUME

Les pays de la zone tropicale sèche ouest africaine, doivent faire face à une demande croissante de céréales dans un contexte agro-socio-économique particulièrement défavorable à leur production. Les agronomes se trouvent ainsi confrontés au défi de devoir accroître la production céréalière, avec le minimum d'engrais, et sans entamer le capital sol.

L'objectif du présent travail est l'étude de la répartition et du devenir de l'azote dans les différents compartiments du système sol-plante en vue d'arriver le plus précisément possible à la quantification des inputs et des outputs. Les résultats obtenus sont utilisés pour définir les principes régissant la maîtrise du bilan azoté au niveau des systèmes de culture céréale-légumineuse étudiés.

Ainsi, la démarche adoptée repose sur l'hypothèse qu'une analyse plus fine des mécanismes régissant le cycle de l'azote, fondée sur les techniques isotopiques, permettra d'atteindre cet objectif et ainsi de dégager des solutions économiquement acceptables.

Ce travail a été réalisé au Centre National de Recherche Agronomique de Bambey (Sénégal) à partir de modèles expérimentaux et d'essais aux champs mis en place en quatre zones écologiques du Sénégal : sub-sahélienne (Thilmakha), soudanienne-nord (Bambey), soudanienne-sud (Nioro) et sub-guinéenne (Séfa).

Le plan de l'étude s'articule autour du thème central de l'optimisation du cycle de l'azote :

- Optimisation de l'utilisation de l'azote par les céréales,
- Contribution des légumineuses au pool d'azote du sol,
- Maîtrise des flux d'azote dans les systèmes de culture étudiés.

Les principaux résultats sont les suivants :

1) **Pour les céréales**, il a été mis en évidence que malgré un fort effet direct, l'engrais azoté sur la céréale est assez mal utilisé, les coefficients réels d'utilisation de l'azote étant de 25 % (mil) et 35 % (maïs) en moyenne. En revanche, cet engrais a surtout pour effet de mobiliser l'azote du sol qui constitue 50 % et 70 % de l'azote total respectivement du maïs

et du mil ayant reçu une dose d'engrais optimale ou sub-optimale. Par ailleurs, une fraction notable de l'azote engrais, de l'ordre de 30 à 50 %, est immobilisée dans le sol et pourra donc avoir un effet rémanent. Dans différentes situations, cette fraction de l'azote engrais susceptible de participer au cycle interne de l'azote et de ce fait d'être potentiellement récupérable par les cultures suivantes a été estimé dans une fourchette. Les pertes sont également importantes et peuvent aller jusqu'à 40 % de l'engrais apporté ; elles sont dues essentiellement à la volatilisation.

Des différences existent entre les céréales ; en effet, la part de l'azote total provenant de l'engrais chez le maïs est supérieure à celle du mil. De plus, le maïs de par son bon indice de rendement, valorise mieux l'azote absorbé, comme BLONDEL (1970) l'avait déjà noté.

Ainsi, il est possible de tirer de ces résultats plusieurs enseignements permettant de rechercher les voies de l'optimisation de l'utilisation de l'azote par les céréales :

- la réduction des pertes est une voie importante d'économie de l'azote, qui a été explorée. D'une part, le processus de volatilisation a été étudié en milieu contrôlé, ce qui a permis d'attribuer l'essentiel des pertes dans l'atmosphère aux techniques d'apport de l'engrais en surface. D'autre part, les techniques de localisation de l'engrais ont été étudiées *in situ,* permettant de réduire trés sensiblement les pertes dans l'atmosphère, voire de les annuler ;

- l'effet direct de l'engrais azoté n'est qu'apparent. En réalité, l'alimentation azotée de la céréale, comme l'effet de l'apport d'azote, sont régis par le pool d'azote du sol utilisable par les plantes, évalué par la valeur A. Son rôle semble d'autant plus important que l'indice de rendement de la céréale est bas. Il constitue, à cet égard, un volant de sécurité. Contrairement à l'enfouissement de paille qui n'accroît pas la valeur A, la paille compostée l'accroît et contribue de ce fait à renouveler et augmenter l'azote mobilisable.

Ces faits permettent d'affirmer que la fourniture d'azote à la céréale est tributaire de l'entretien organique du sol. Dans un contexte de faible disponibilité en résidus organiques et fumure azotée **il faut tenter d'assurer cet entretien en compostant les pailles** directement ou par l'intermédiaire des animaux (fumier) et **en maximisant la source d'azote exogène constituée par une légumineuse en rotation avec la céréale.**

2) **Pour les légumineuses**, la technique isotopique (^{15}N) a permis l'évaluation de la fixation de N_2 à l'unité de surface sur le cycle. Il devenait ainsi possible de quantifier la contribution de cette fixation au pool d'azote du sol à l'aide d'un certain nombre d'estimations sur la biomasse racinaire, et d'étudier l'incidence des facteurs qui la contrôlent.

Parmi ces facteurs, il a été mis en évidence :

(a) des différences variétales chez le soja : la fixation peut assurer de 73 à 81 % de l'alimentation azotée et l'indice de rendement (donc, la part exportatrice) va de 79 à 85 %. Bien que ces différences ne soient pas très élevées, ceci engage à rechercher des variétés de légumineuses à fort pouvoir fixateur de N_2 et dont l'exportation d'azote en conditions de culture n'excède pas la fixation ;

(b) le fort effet dépressif de la sécheresse, qui affecte la fixation avant la croissance, et peut entraîner un surcroît de l'alimentation azotée aux dépens du sol. Cet effet peut être aggravé par des apports d'engrais en surface ;

(c) l'importance de la fertilisation phosphatée, dans des sols souvent carencés en phosphore, qui accroît le rendement mais sans modifier l'équilibre entre les deux sources d'azote;

(d) l'impact d'une inoculation du sol lorsque le rhizobium spécifique fait défaut ;

(e) l'amélioration apportée par l'inoculation par des champignons mycorhiziens dans les sols où leur potentiel d'infection est faible. L'accroissement de la part de N_2 fixé dans l'alimentation de la plante (% NdfFix) amène à distinguer toutefois l'effet mycorhizien du simple effet phosphate ;

(f) l'effet inhibiteur de l'azote minéral dans le sol, qui rend délicate la pratique des fumures starter, mais dont l'effet peut être réduit par la culture associée céréale-légumineuse et un choix variétal judicieux (voir ci-dessus).

Ainsi, il apparaît que certains facteurs n'agissent sur la fixation que par la modification du rendement et de la demande de la plante, ce sont des facteurs d'intensification, alors que d'autres ont un effet plus particulier sur l'équilibre des sources d'azote (fixation de N_2 et sol). Ces derniers doivent plutôt être considérés comme des facteurs d'économie d'azote.

3) **Pour les systèmes céréales-légumineuses**, la connaissance de ces éléments a permis de quantifier les flux d'entrée (inputs) et de sortie (outputs), à partir desquels il est possible de raisonner une stratégie d'économie de l'azote :

(a) il est possible de limiter les pertes d'azote par localisation de l'engrais ; des applications d'engrais sur la céréale, trés efficaces économiquement sont alors envisageables;

(b) il est possible d'accroître la fixation de N_2 pour alimenter le pool d'azote du sol, et la part qu'il prendra dans la satisfaction des besoin en azote de la céréale, et en fin de compte limiter l'usage de l'engrais. Tout revient alors à un déplacement de consommation d'azote à partir du sol, de la légumineuse vers la céréale, qui accroît la part de la fixation (source gratuite) et limite celle de l'engrais (source coûteuse). Les pertes d'azote, toujours liées au niveau de l'apport, seront de surcroît diminuées.

Cependant un tel système suppose réunies deux conditions :

(c) l'exportation d'azote par la légumineuse doit être inférieure à la fixation de N_2,

(d) l'azote minéral du sol ne doit pas être limitant de la fixation de N_2, et pour cette raison, l'azote minéralisable du sol ne peut être trop élevé.

Finalement, ces deux dernière conditions limitent le système à un niveau semi-intensif. Une façon d'en repousser les limites serait d'intervenir sur les facteurs qui déplacent l'équilibre de nutrition azotée de la légumineuse en faveur de la fixation de N_2 (choix variétal, champignons mycorhiziens, techniques d'évitement de la sécheresse), et de la céréale en faveur de la source sol (étalement de la demande dans le temps, systèmes racinaires). Bien entendu, cette stratégie trouve aussi une limite en fonction des conditions pédoclimatiques (texture, régime pluviométrique, cultures possibles).

Pour établir les bilans sur lesquels se fonde le raisonnement, à côté des termes directement déterminés, il a fallu recourir à un certain nombre d'estimations pour compenser les lacunes de connaissances actuelles de certains processus.

La lixiviation de l'azote du sol peut être un terme important dont la quantification pose de sérieux problèmes de méthode, et dont la prise en compte de la variabilité implique de longues séries de mesures. La biomasse racinaire, dont l'évaluation est difficile *in situ* est est indispensable à l'estimation de la part de l'azote fixée et restée dans le sol. La fixation rhizosphérique en est également tributaire. Enfin, la dénitrification est très dépendante des conditions physicochimiques et des apports de matière organique fraîche métabolisable.

En application, il est montré un exemple de régénération d'un sol dégradé, par l'amendement organique (fumier) par effet direct mais aussi et surtout par effet induit sur la fixation de N_2 de l'arachide. L'exemple d'un système mil-arachide dont le bilan azoté, déficitaire, exige, au minimum, la restitution des pailles (ce qui pose le problème de leur transformation et de l'incorporation au sol) est également montré.

Enfin, la fragilité des systèmes maïs-soja et, en conséquence, l'obligation de recourir à des techniques efficaces d'apport d'azote (inoculation et fumure organique du soja, fertilisation azotée optimale du maïs).

Cette approche conduit à l'élaboration d'un **schéma** sur lequel les situations réelles peuvent être raisonnées. Elle implique en corollaire la connaissance du **déterminisme** des différents éléments de ce schéma, sans doute d'autant plus aisée à réaliser que l'on s'adresse à des processus élémentaires. Il devrait alors être possible d'accéder à une **modélisation** s'appuyant sur ce schéma et quelques **indicateurs simples**.

Mots clés : Sénégal, Cycle azote, Céréales, Légumineuses, Engrais azoté, Fixation de N_2, Coefficient réel d'utilisation, Immobilisation, Pertes, Valeur A.

- SUMMARY -

In upland tropical sandy soils of West Africa, the real nitrogen recovery for cereals is much less than we expected because the crops such as pearl millet and maize use respectively 25 and 30 % of applied fertilizer nitrogen according to the farmers' methods recommendation. Nitrogen fertilizer application to the soil increases the soil nitrogen uptake by the crop (this term is named by the author "available nitrogen pool") probably due to the root system extension and the prime effect. A large part of the applied fertilizer to the soil (about 30 to 50 %) is immobilized by microflora.

Ammonia volatilization from urea is studied in greenhouse experiment (simulation of field conditions). It could reach 40 % of the broadcasted N-urea in sandy soil (this technics is the one recommanded for the farmers of Senegal). The nitrogen fixed by groundnut or soybeans represents 20 to 80 % of the N_2 uptake by the crops.Changes in the magnitude of this process are important. Certains major factors contributing to the fixation such as the presence of effective specific rhizobium strains, the mineral soil N, the varieties, the fertilizers N, the manure and liming, were studied.

From those results, the author have recommended methods which can improve the nitrogen crop nutrition by controlling the nitrogen balance at the level of the agricultural system. The principles of these methods were tested *in situ*. The results also show that the nitrogen balance in the upland tropical soil is negative in most cases which often explain the reduction of the total soil nitrogen pool during years of cultivation. All these aspects have shown that the use of grain legume is becoming the key of maintaining the nitrogen balance of the upland tropical soil of West Africa.

Key words : Senegal ; Cereals ; Grain legumes ; Nitrogen fertilizer ; N_2 fixation ; Real nitrogen recovery ; Nitrogen balance ; Immobilisation ; Volatilization.

TABLE DES MATIERES

Avant-propos et remerciements

Abréviations utilisées 8

Glossaire 12

INTRODUCTION GENERALE 18

CHAPITRE I - CADRE DE L'ETUDE 26

I.1 - Le milieu climat - sol - végétation 28

I.1.1 - Le climat 28
I.1.2 - Les sols 33

I.1.2.1 - Caractéristiques des sols sur table quaternaire 33
I.1.2.2 - Caractéristiques des sols sur Continental Terminal 35
I.1.2.3 - Evolution annuelle du taux d'azote minéral des sols 35
I.1.2.4 - Description des sols des différents essais 36

I.1.3 - La végétation 36

I.2 - Situation agricole céréalière présente et en perspective au Sénégal 40

CHAPITRE II - LES ELEMENTS DU BILAN AZOTE 43

II.1. Les approches du bilan de l'azote dans l'agrosystème 47

II.1.1. Bilan sur plusieurs années (première approche) 47
II.1.2. Bilan réel des différents flux d'azote (^{15}N) (deuxième approche) 49
II.1.3. Bilan "troisième approche" : détermination des outputs inconnus 52

II.2. Bilan de l'engrais azoté dans le système sol-plante 52

CHAPITRE III : TECHNIQUES ET METHODES 56

III.1 - Techniques Analytiques 58

III.1.1 - Définition 58
III.1.2 - Dosages chimiques 58
III.1.3 - Dosages isotopiques 59

III.2 - Méthodes isotopiques de quantification et d'interprétation 62

III.2.1 - Méthode isotopique de quantification du pool d'azote du sol : concept de la valeur A 62
III.2.2 - Méthode isotopique de quantification *in situ* de la fixation de N_2 63

III.2.2.1 - L'engrais azoté est la source d'azote 15 64
III.2.2.2 - L'engrais azoté immobilisé dans le sol est la source d'azote 15 66

III.2.3 Méthode isotopique d'évaluation d'un facteur du milieu, d'une variété ou d'une technique culturale sur le critère de l'utilisation optimale de l'azote 67

III.2.3.1 - Céréales 67
III.2.3.2 - Légumineuses 68

III.3 - Erreurs analytique - Traitement statistique des résultats 70

CHAPITRE IV - OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE L'AZOTE DES ENGRAIS ET DU SOL DANS LES SYSTEMES SOL-PLANTE NON FIXATEURS DE N_2 73

IV.1 - Les dispositifs expérimentaux 75

IV.1.1. Essai au champ I 77
IV.1.2. Essai au champ II 80
IV.1.3. Essai au champ III 80
IV.1.4. Essai au champ IV 80
IV.1.5. Essais au champ V, VI et VII 81

IV.2 - Disponibilité et utilisation de l'azote provenant du sol et de l'engrais 85

IV.2.1 - Disponibilité de l'azote sous cultures de mil et de maïs
Essais au champ I à VII 87

IV.2.1.1. Rendement, productivité et rentabilité de l'engrais 87
IV.2.1.2. Coefficient réel d'utilisation de l'engrais 92
IV.2.1.3. Immobilisation de l'engrais 97
IV.2.1.4. Efficience de l'engrais 97
IV.2.1.5. Fourniture d'azote par le sol 103

IV.2.1.6. Conclusion 106

IV.2.2 - Variabilité spatiale. Essai au champ IV 109

IV.2.2.1. Coefficient réel d'utilisation de l'engrais 109
IV.2.2.2. Immobilisation de l'engrais 110
IV.2.2.3. Efficience de l'engrais 110
IV.2.2.4. Fourniture d'azote par le sol 110
IV.2.2.5. Conclusion 116

IV.2.3 - Lixiviation de l'engrais. Essai au champ III 116

IV.2.3.1. Lixiviation en cours de cycle et utilisation de l'engrais par la plante 116
IV.2.3.2. Profondeur de lixiviation de l'engrais 118
IV.2.3.3. Conclusion 120

IV.2.4 - Volatilisation de l'engrais. Essai en milieu contrôlé 120

IV.2.4.1. Facteur sol 123
IV.2.4.2. Facteur placement 123
IV.2.4.3. Facteur dose 123
IV.2.4.4. Discussion - conclusion 126

IV.3. Optimisation de l'utilisation de l'azote 129

IV.3.1. L'enfouissement de paille est-il bénéfique ? Essai au champ II 132
IV.3.2. Le compostage de la paille améliore-t-il l'efficience de l'azote ? Essai au champ II 136
IV.3.3. L'effet du compost est-il accru par les application répétées ? Essai au champ I 138
IV.3.4. Optimisation de la méthode de placement de l'engrais. Essais au champ V, VI et VII 142

IV.3.1.4.1. Rendement 143
IV.3.1.4.2. Coefficient réel d'utilisation de l'engrais 144
IV.3.1.4.3. Immobilisation de l'engrais 144
IV.3.1.4.4. Efficience de l'engrais 145
IV.3.1.4.5. Valeur A et efficience relative de l'engrais 145
IV.3.1.4.6. Conclusion 147

IV.4. Conclusion du chapitre IV 149

CHAPITRE V : CONTRIBUTION DES LEGUMINEUSES AU POOL D'AZOTE DU SOL 151

V.1 - Dispositifs expérimentaux 156

V.1.1 - Essai au champ VIII 158

V.1.2 - Essai au champ IX 161

V.1.3 - Essai en lysimètre X 162
V.1.4 - Essai au champ XI 163
V.1.5 - Essai au champ XII 164
V.1.6 - Essai au champ XIII 166
V.1.7 - Essai au champ XIV 167

V.2 - Choix variétal - Essai au champ VIII 170

V.3 - Contraintes du milieu 176

V.3.1 - Contrainte chimique 178

V.3.1.1 - Problème de l'azote minéral du sol 178

V.3.1.1.1 - Faut-il augmenter l'azote minéral en apportant des engrais azotés ? Essai au champ IX 178
V.3.1.1.2 - Faut-il réduire l'azote minéral en pratiquant la culture associée légumineuse-céréale ? Essai en lysimètre X 182

V.3.1.2 - Amélioration de la fertilité par l'amendement calcique et organique. Essai au champ XI 189
V.3.1.3 - Amélioration de la fertilité par le phosphatage. Essai au champ XII et XIV 194

V.3.2 - Contrainte biologique 196

V.3.2.1 - Les sols n'ont pas de rhizobiums spécifiques. Essai au champ XIV 196
V.3.2.2 - Les sols sont défavorables à la nodulation et à la fixation de N_2. Essai au champ XI 197
V.3.2.3 - Les sols sont bien pourvus en rhizobiums mais on veut accroître leur efficience. Essai au champ XIII 198
V.3.2.4 - Les sols sont dépourvus ou mal pourvus en champignons mycorhiziens Essai au champ XIV 198

V.3.3 - Contrainte climatique 202

V.3.3.1 - Relation entre la pluviométrie et la fixation de N_2. Essais IX et XIII. Essais XII et XIV 202
V.3.3.2 - Déficit hydrique et fixation de N_2 en cours de cycle. Essai XIII 206
V.3.3.3 - Conclusion 207

V.4 - Conclusion du chapitre V 207

CHAPITRE VI - MAITRISE DES FLUX D'AZOTE DANS TROIS SYTEMES DE CULTURE.

VI.1 - Principes régissant la manipulation des flux d'azote dans les systèmes de culture 214

VI.2 - Application des principes définis ci-dessus à trois systèmes de culture 216

VI.2.1 - Le système de culture mil-arachide de Thilmakha en zone sub-sahélienne 216
VI.2.2 - Le système de culture mil-arachide à Bambey en zone soudanienne nord 218
VI.2.3 - Le système de culture maïs-soja à Séfa en zone sub-guinéenne 221

VI.3. - Conclusion chapitre VI 223

CONCLUSION GENERALE 226

Bibliographie **234**

Annexes **256**

Résumé **341**

Summary **347**

Table des matières **351**

UNIVERSITÉ
NANCY
BIBLIOTHEQUE-SCIENCES

Office d'Edition de la Recherche Scientifique
et Coopération Internationale

O.E.R.S.C.I.

REPROGRAPHIE INDUSTRIELLE
EDITIONS - DUPLICATIONS

Parc Modulopolis H 1 Zone Euromédecine
Montpellier 67.52.20.05

Année 1990
Nom de l'auteur : **GANRY Francis**
Université de Nancy I

R E S U M E

La présente étude a pour objectif l'étude quantitative du cycle de l'azote dans les systèmes de cultures actuels, arachide-mil et soja-maïs de la zone tropicale sèche ouest africaine. L'auteur fait l'hypothèse que la maîtrise du bilan azoté permettra de dégager des solutions économiquement acceptables.

Cette étude est fondée sur des expérimentations au champ et le recours systématique à la méthodologie isotopique, permettant ainsi de quantifier avec certitude des processus connus presque exclusivement sur le plan des mécanismes. Il s'agit en tout premier lieu de la fixation de N_2 sur laquelle les informations quantitatives étaient jusqu'à présent absentes en Afrique de l'Ouest. Il s'agit aussi des processus d'immobilisation dans les sols (par voie microbienne et par voie végétale, c'est-à-dire par incorporation dans les résidus de récolte). Les pertes d'azote ont pu être évaluées dans tous les cas mais de façon globale sans qu'il ait été possible de déterminer la part de la volatilisation ou de la dénitrification. Le processus de volatilisation a cependant été étudié en milieu contrôlé.

Dans les sols sableux tropicaux de la zone soudanienne et dans les systèmes de culture actuels, le coefficient réel de d'utilisation de l'engrais azoté par la céréale est beaucoup plus faible qu'on ne pouvait l'imaginer puisque la plante utilise seulement 25 % (mil) et 35 % (maïs) de l'azote engrais qu'on lui a apporté. L'apport d'engrais azoté au sol accroît l'absorption par la plante des réserves en azote du sol (désignées par l'auteur sous le terme de "pool d'azote mobilisable"), probablement grâce à l'extension du système racinaire et à un "prime effect". Une fraction importante (de l'ordre de 30 à 50 %) de l'engrais apporté au sol (beaucoup plus importante qu'on ne pouvait le supposer *a priori* dans les sols sableux étudiés), est immobilisée par voie biologique dans les sols. La volatilisation de l'azote - étudiée en conditions simulant celles du champ - peut représenter jusqu'à 40 % de l'urée apportée en surface (en sols sableux) selon la technique actuellement vulgarisée. La fixation de N_2 par l'arachide ou le soja représente de 20 à 80 % de l'azote absorbé par les cultures, les variations dans l'intensité du processus pouvant être considérables. L'incidence des facteurs qui contrôlent cette fixation a été étudiée. Il s'agit des facteurs environnementaux (rhizobium spécifique, endomycorhizes, sécheresse, azote minéral du sol et fertilité du sol) et des facteurs "pratiques culturales" (variétés, engrais-N, engrais-P, fumier et chaux).

Ces résultats ont conduit l'auteur à proposer des méthodes permettant d'améliorer la nutrition azotée des cultures par une maîtrise du bilan azoté au niveau du système de culture : la validité de ces différentes méthodes, dont les principes sont décrits en détail, a été vérifiée *in situ*. En particulier, il se confirme que la légumineuse est la clé du maintien du bilan azoté des sols sableux tropicaux en culture pluviale semi-intensive.

Mots clés : Sénégal, Cycle de l'azote, Céréales, Légumineuses, Engrais azoté, Fixation de N_2, Coefficient réel d'utilisation, Immobilisation.