Contribution des légumineuses arbustives à l'alimentation azotée du maïs (Zea mays l.) : cas d'un système de culture en allées dans le centre-sud Sénégal

Mamadou Ndiaye

▶ **To cite this version:**

Mamadou Ndiaye. Contribution des légumineuses arbustives à l'alimentation azotée du maïs (Zea mays l.) : cas d'un système de culture en allées dans le centre-sud Sénégal. Agronomie. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1997. Français. NNT : 1997INPL020N . tel-01776298

HAL Id: tel-01776298

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776298

Submitted on 24 Apr 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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

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

97 INPL 020 N

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE

ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

THÈSE

Présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INPL

Spécialité : Sciences Agronomiques

par

Mamadou NDIAYE
Ingénieur agronome

Sujet :

CONTRIBUTION DES LÉGUMINEUSES ARBUSTIVES A L'ALIMENTATION AZOTÉE DU MAÏS *(Zea mays* L.) : *cas d'un système de culture en allées dans le Centre-Sud Sénégal*

Soutenue publiquement le 21 février 1997

devant la commission d'examen

Membres du Jury :

M.	**A. GUCKERT**	*Président*
M.	**F. GANRY**	*Directeur de thèse*
M.	**MERGUES**	*Rapporteur*
M.	**ENACH**	*Rapporteur*
M.	**ON**	*Examinateur*
Mme.	**A.N. BADIANE**	*Examinateur*

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

D 136 009243 2

13600 92432 97INPL020N

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE

ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

THÈSE

[M]1997 NDIAYE, M.

Présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INPL

Spécialité : Sciences Agronomiques

par

Mamadou NDIAYE
Ingénieur agronome

Sujet :

CONTRIBUTION DES LÉGUMINEUSES ARBUSTIVES A L'ALIMENTATION AZOTÉE DU MAÏS (*Zea mays* L.) : *cas d'un système de culture en allées dans le Centre-Sud Sénégal*

Soutenue publiquement le 21 février 1997

devant la commission d'examen

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

Membres du Jury :

M.	**A. GUCKERT**	*Président*
M.	**F. GANRY**	*Directeur de thèse*
M.	**Y.R. DOMMERGUES**	*Rapporteur*
Mme.	**A.M. DOMENACH**	*Rapporteur*
M.	**F. LE TACON**	*Examinateur*
Mme.	**A.N. BADIANE**	*Examinateur*

"Désertification et déforestation, feux de brousse et savanisation, érosion et appauvrissement des sols, sécheresse et diminution des réserves en eau, surexploitation de certains milieux, dégradation des conditions de vie et de l'environnement...

Il ne s'agit pas d'accumuler tous les clichés disponibles (d'ailleurs, il y en aurait trop !), et de se complaire dans une longue liste de catastrophes plus ou moins amplifiées par les médias. Il ne s'agit pas, non plus, de crier au scandale, de rendre les paysans et les ingénieurs (!) responsables de ces catastrophes, et de réclamer de simples mesures de protection de la Nature. Car il ne s'agit surtout pas de limiter le développement agricole, et de s'opposer au progrès économique d'un continent qui en a tant besoin...

Non. On aura compris qu'il s'agit de se demander - ici - ce qu'une communauté scientifique particulière peut faire, et doit faire, face à quelques unes des difficultés de l'Afrique actuelle."

J.P. Richard, 1990.

Extrait de l'ouvrage "La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest", UCAD, Dakar, P 300.

AVANT PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé d'une part à l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) dans son Centre National de Recherches Agronomiques (CNRA) de Bambey et d'autre part au Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) dans l'Unité de Recherches sur les Facteurs et Conditions du Milieu (UR-FCM). Je tiens donc, tout d'abord à remercier vivement les Directeurs Généraux de l'ISRA et du CIRAD.

Je suis scientifiquement et moralement redevable à M. F. GANRY, à qui je dois l'initiative et la direction de cette thèse. Qu'il trouve l'expression de ma profonde reconnaissance. Il n'a ménagé aucun effort, avec une constante humeur et une grande disponibilité, pour assurer avec son expérience en zone tropicale, la direction de cette thèse.

Je remercie le Professeur A. GUCKERT pour la confiance qu'il m'a m'accordée en acceptant mon inscription en thèse et pour la qualité de ses réflexions tant au niveau du projet que de la "finalisation" de cette thèse.

J'exprime ma profonde reconnaissance à M. R. OLIVER qui, avec un constant dévouement et une disponibilité sans égale m'a aidé tout au long de ce travail. Je lui dois de nombreuses idées lors de nos fructueuses discussions et suis heureux d'avoir bénéficié en informatique de son esprit critique et de sa technicité.

"Beaucoup remercier signifie secrètement demander davantage" dit le proverbe. Alors, c'est vrai je remercie beaucoup M. Y.R. DOMMERGUES, très sincèrement, mais, comme dit le proverbe, cela sous-entend implicitement que j'aimerais pouvoir encore bénéficier de son aide et que la Recherche agricole sénégalaise qui lui est déjà tellement redevable puisse encore bénéficier de sa contribution: disons que mon remerciement est rétrospectif, présent et prospectif.

Que soit remerciée Mme A.M. DOMENACH pour ses précieux conseils auxquels la première partie de ce travail doit beaucoup, fondée sur la méthode de l'abondance naturelle ^{15}N, méthode sur laquelle peu de chercheurs au monde ont autant travaillé que Mme DOMENACH, faisant ainsi émerger cette méthode au rang de méthode de quantification de la fixation de N_2 fiable et facile à mettre en oeuvre. Et ce n'est pas exagéré de dire que pour l'Afrique, où la fixation de N_2 est un des éléments moteurs de l'intensification agricole progressive, l'impact de cette méthode est considérable. Qu'elle soit remerciée également d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie M. F. Le TACON pour l'intérêt qu'il porte à la microbiologie forestière tropicale et d'avoir accepté d'être membre du jury.

Ce travail de thèse en alternance ne serait jamais arriver à son terme sans la collaboration scientifique, sans faille, de Madame A.N. BADIANE, je la remercie très sincèrement de sa contribution et d'avoir accepté d'être membre du jury.

je tiens à exprimer mes remerciements et ma reconnaissance à M. M. GUEYE et de M. D. ANNEROSE pour leurs conseils très avisés et leur contribution à ce travail.

Mes relations amicales avec l'équipe du Programme agroforestier de l'ISRA ont facilité la réalisation de mes travaux; j'exprime ma profonde gratitude à tous les chercheurs de cette équipe pour leur collaboration effective dans ce travail.

Certaines de mes expériences au laboratoire de l'UR-FCM du CIRAD-CA ne seraient pas arrivées à terme sans la disponibilité et le dévouement de MM. P. BEUNARD et D. MONTANGE; je tiens donc à les remercier très vivement. A ce titre, je tiens également à remercier MM. J.L MARGER et J. ROMERO pour leur très précieuse collaboration technique dans la réalisation de mes travaux de laboratoire.

Toute ma sympathie va à Mesdames KELEMEN, LOUYS et PUARD pour leur amabilité et leur incessante assistance sans oublier toute l'équipe de l'UR-FCM au sein de laquelle j'ai trouvé un accueil et une ambiance scientifique très favorables.

Je n'aurais garde d'oublier l'équipe technique très disponible qui m'a assuré avec sérieux et compétence le suivi et la réalisation des expériences sur le terrain : I. DIOUM, G. DEME, A. FAYE, Y. NDIAYE, S. CISSE et O TOURE. A ce titre j'associe ces remerciements à tous les agents du Laboratoire central des "sols, eaux et plantes" et du Laboratoire SR/Sol N du CNRA de Bambey pour les analyses qu'ils ont effectué dans le cadre de ce travail. Je remercie S. NIANG chef de la station de Nioro pour sa collaboration.

Je ne saurais oublier ma famille et tous mes amis qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout de la réalisation de ce travail.

Cette thèse est dédiée à la mémoire de mon père Lamine Ngodiane et de ma soeur Dieynaba Coco NDIAYE.

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS
GLOSSAIRE
LISTE DES TABLEAUX
LISTE DES FIGURES
INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE I. CADRE DE L'ETUDE

1.1. Le milieu 10
1.1.1. Climat 10
1.1.2. Sols 12
1.1.3. Végétation du centre Sud Sénégal 12
1.2. Situation maïsicole au Sénégal 12

CHAPITRE II. TECHNIQUES ET MÉTHODE

2.1. Techniques expérimentales 17
2.2. Techniques analytiques 17
2.2.1. Dosages chimiques 17
2.2.2. Doses isotopiques 18
2.3. Méthode d'étude de la biodégradation des émondes 18
2.3.1 Au laboratoire 18
2.3.2. Au champ 19
2.4. Méthodes isotopiques de quantification des flux: fixation de N_2 et alimentation azotée du maïs 21
2.4.1. Définitions 21
2.4.2. Quantification de la fixation de N_2 in situ par la technique d'abondance naturelle ^{15}N 23
2.4.3. Méthode isotopique de quantification du pool du sol en lysimètres et au champ 24
2.4.4. Méthode de quantification de la contribution des émondes à l'alimentation azotée du maïs : application de la méthode de valeur A (en lysimètres et au champ) 25
2.5. Essai préliminaire pour le choix de *Senna siamea* comme plante de référence dans l'évaluation de la fixation de N_2 de *Gliricidia sepium* 27

CHAPITRE III. DIAGNOSTIC ET APPROCHE SPATIALE DE LA FIXATION DE N_2 PAR L'ARBRE A L'ECHELLE DU PAYS

3.1. INTRODUCTION 29
3.2. TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE 30
3.2.1. Détermination du pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) des arbres fixateurs de N_2 . . . 30
3.2.2. Détermination de δ ^{15}Np 31
3.2.3. Analyse statistique 31
3.3. RÉSULTATS 32
3.3.1. Teneur en N et δ ^{15}N des sols 32
3.3.2. δ ^{15}Na de la plante fixatrice de N_2 poussant sur milieu nutritif sans N minéral . . . 33
3.3.3. δ ^{15}N des plantes de référence 33
3.3.4. Pourcentage de N_2 fixé 37
3.3.4.1. Pourcentage de N_2 fixé à Bambey 37

3.3.4.2. Pourcentage de N_2 fixé à Nioro . . . 37
3.3.4.3. Pourcentage de N_2 fixé à Djibélor . . . 38
3.3.5. Essai d'amélioration de la fixation de N_2 de *Gliricidia sepium* à Nioro . . . 39
3.4. DISCUSSION-CONCLUSION . . . 41

CHAPITRE IV. ETUDE *IN VITRO* DE LA CINÉTIQUE DE BIODÉGRADATION *IN VITRO* D'EMONDES DE *GLIRICIDIA SEPIUM* ET DE *SENNA SIAMEA* DANS UN SOL SABLEUX DU SÉNÉGAL

4.1. INTRODUCTION . . . 43
4.2. MATÉRIEL ET MÉTHODE . . . 44
4.2.1. Matériel végétal . . . 44
4.2.2. Sol utilisé . . . 44
4.2.3. Méthode . . . 45
4.3. RÉSULTATS . . . 45
4.3.1. Analyse des émondes . . . 45
4.3.2. Minéralisation de N dans le sol . . . 46
4.3.3. Biodégradabilité des émondes . . . 51
4.4. DISCUSSION . . . 55
4.5. CONCLUSION . . . 57

CHAPITRE V. ETUDE AU CHAMP DE LA CINÉTIQUE DE BIODÉGRADATION D'EMONDES DE *GLIRICIDIA SEPIUM* DANS LE SOL. RECHERCHE DE LA SYNCHRONISATION ENTRE L'OFFRE EN AZOTE PAR LES EMONDES ET LA DEMANDE EN AZOTE PAR LE MAÏS

5.1. INTRODUCTION . . . 58
5.2. TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE . . . 59
5.2.1. Description du site d'expérimentation . . . 59
5.2.2. Matériel végétal utilisé . . . 59
5.2.3. Dispositif expérimental . . . 60
5.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION . . . 63
5.3.1. Cinétique de biodégradation et de libération de N des émondes de *G. sepium* . . . 63
5.3.2. Effets comparées des émondes de *G. sepium* et de l'urée sur le rendement du maïs 63
5.3.2.1. Effets sur la croissance et le développement des parties aériennes . . . 63
5.3.2.2. Effets sur les composantes de rendement . . . 66
5.3.3. Cinétique de libération de N des émondes *G. sepium* et absorption de N . . . 68
5.3.4. Efficacité des émondes de *G. sepium* sur le maïs . . . 68
5.3.5. Optimisation du C.A.U % . . . 70
5.3.6. Synchronisation avec les besoins en eau du maïs en fonction de la pluviométrie . . 71
5.4. CONCLUSION . . . 73

CHAPITRE VI. CONTRIBUTION DE L'AZOTE DES EMONDES ET DES AUTRES SOURCES D'AZOTE DANS L'ALIMENTATION AZOTÉE DU MAÏS EN CULTURE EN COULOIRS.

6.1. INTRODUCTION . . . 75
6.2. TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES . . . 76
6.2.1. Expérience en lysimètres . . . 76
6.2.2. Expérience au champ . . . 79

6.2.2.1. Mesure de la variabilité spatiale 79
6.2.2.2. Mise en place de l'essai 80
6.3. RÉSULTATS 81
6.3.1. Etude de la variabilité pour le contrôle du dispositif 81
6.3.2. Matière sèche, teneur et quantité de N total des parties aériennes du maïs 82

6.3.3. Estimation de l'Indice de Surface Equivalente (ISE) 85
6.3.3.1. Culture pure de maïs avec N 87
6.3.3.2. Culture pure de maïs avec N 87
6.3.4. Valeur A, Ndff, Ndfe et Ndfs, CRU 87
6.3.5. Comparaison quantitative des émondes et du sulfate d'ammonium (s.a) en termes de produit et en termes de N 92
6.3.6. Contribution de la fixation de N_2 du *G. sepium*, via les émondes, à l'alimentation azotée du maïs 93
6.3.7. Importance du sytème racinaire des arbres dans la réussite de l'association arbre-culture 95
6.3.7.1. Démarrage de la plantation de l'arbre 95
6.3.7.2. Rôle des racines de l'arbre dans la concurrence vis à vis de la culture associée 96

6.4. DISCUSSION-CONCLUSION 97

DISCUSSION-CONCLUSION GÉNÉRALE - 99

PERSPECTIVES 104

BIBLIOGRAPHIE 106

ANNEXES

ABREVIATIONS

Abréviations relatives au climat

ETR : Evapotranspiration réelle
ETM : Evapotranspiration maximale

Abréviations relatives au sol

RFU : Réserve en eau facilement utilisable
ST : Surface totale
SAU : Surface agricole utile

Abréviations relatives à l'engrais et aux émondes

C.R.U : Coefficient réel d'utilisation de l'azote: c'est le pourcentage d'azote de l'engrais ou des émondes, absorbé par les parties aériennes
C.A.U : Coefficient apparent d'utilisation de l'azote: c'est la différence entre la quantité d'azote prélevée par la plante fertilisée et celle de la même plante non fertilisée, divisée par la quantité d'azote apportée
IE : Indice d'efficience de l'azote: c'est la production de matière sèche rapportée à la quantité d'azote absorbée

Abréviations relatives à l'arbre

FRN : Fixation réelle d'azote
AFN : Arbre fixateur d'azote
$\delta\ ^{15}N$ ref : Variation naturelle d'abondance isotopique ^{15}N de l'arbre de référence
$\delta\ ^{15}N$ fix : Variation naturelle d'abondance isotopique ^{15}N de l'arbre fixateur d'azote
$\delta\ ^{15}N$ p : Variation naturelle d'abondance isotopique ^{15}N de l'arbre fixateur d'azote poussant sur milieu sans azote minéral
Ndfa % : Pourcentage d'azote fixé par l'arbre

Abréviations relatives à la plante

JAS : Jour après semis
Ndfs : Azote des parties aériennes de la plante provenant de la matière organique du sol
Ndff : Azote des parties aériennes de la plante provenant de l'engrais
Ndfe : Azote des parties aériennes de la plante provenant des émondes
N total : Nfds + Ndff + Ndfe, c'est l'azote total des parties aériennes de la plante

Abréviations relatives au test d'incubation des émondes au laboratoire

V_{t1} et V_{t2} : Volumes de CO_2 dégagé sur 24 heures entre deux dates t1 et t2
V_{t12} : Volume moyen de CO_2 dégagé sur 24 heures
Q_{t12} : Quantité de CO_2 dégagé sur 24 heures
C % : Pourcentage de CO_2 dégagé
C_1 : Quantité de carbone de la partie non biodégradable des émondes
C_2 : Quantité de carbone de la partie biodégradable des émondes
QN_m % : Pourcentage d'azote minéralisé à partir des émondes
$N_{min\ te}$: Teneur en azote minéral du sol+émondes (mg kg^{-1})
$N_{min\ tem}$: Teneur en azote minéral du sol (mg kg^{-1})
C_{ti} : Teneur en azote des émondes (%)

D_{ti} : Dose d'émondes apportées (mg kg^{-1} de terre)

Abréviations relatives à l'étude de la biodégradation des émondes au champ

Y : Matière des émondes
Y_0 : Quantité initiale de matière sèche des émondes
Y_r : Quantité de matière sèche difficilement biodégradable
QN : Quantité d'azote des émondes en cours de biodégradation
QN' : Quantité d'azote libérée par la partie biodégradable des émondes
QN_r : Quantité d'azote de la partie difficilement biodégradable des émondes
QN_0 : Quantité initiale d'azote des émondes
k : constante de biodégradation des émondes
t : temps de biodégradation des émondes

GLOSSAIRE

Fixation de N_2 = C'est la fixation biologique de N_2 ; elle est évaluée quantitativement soit en pourcentage d'azote total de l'arbre (ou de la plante), soit en kg ha^{-1}

Synchronisation = C'est un principe basé sur le fait que le taux de libération d'un élément dans sa forme disponible pour la plante peut être étroitement reliée au taux auquel la plante en a besoin

Indice de surface équivalente = Efficience biologique de l'utilisation de la terre par la culture associée, il représente la surface de terre qui serait nécessaire en cultures pures pour obtenir les mêmes rendements qu'en cultures associées

Valeur A = Elle représente la quantité d'azote disponible dans une source (air, sol ou engrais) exprimée en équivalent engrais de l'engrais apporté

$\delta\ ^{15}N$ = C'est la variation du rapport isotopique d'un échantillon en référence à celui d'un étalon (air par exemple)

Demi-vie des émondes = Temps nécessaire pour avoir 50 % des émondes biodégradées

TABLEAUX

Tableau 1. Techniques d'analyses pratiquées au laboratoire central d'analyses "sol-eau-plante" du CNRA de Bambey de l'ISRA , Sénégal..

Tableau 2. Teneurs en N et δ ^{15}N des sols.

Tableau 3 a: Teneurs en N et δ ^{15}N des plantes à Bambey.

Tableau 3 b: Teneurs en N et δ ^{15}N des plantes à Nioro.

Tableau 3 c: Teneurs en N et δ ^{15}N des plantes à Djibélor.

Tableau 4 a: Pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) à Bambey.

Tableau 4 b: Pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) à Nioro.

Tableau 4 c: Pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) à Djibélor.

Tableau 5: Effet de l'inoculation de la souche de Bradyrhizobium TAL5 sur la production des parties aériennes, la formation des nodosités et le δ ^{15}N du *Gliricidia sepium*.

Tableau 6: Teneur en C et N des émondes de *G. sepium* et *S. siamea.*

Tableau 7: Résultats synthétiques de l'analyse statistique des teneurs en N minéral.

Tableau 8: Résultats synthétiques de l'analyse statistique des quantités de C dégagées.

Tableau 9: Coefficients des courbes cumulées de la biodégradation in vitro des émondes.

Tableau 10: Effets des émondes de *G. sepium* et de l'engrais minéral (urée) sur les composantes de rendement du maïs (CP 75)

Tableau 11: Effets des émondes de *G. sepium* et de l'engrais minéral (urée) sur le rendement du maïs (CP 75)

Tableau 12 Valeurs des paramètres de la fonction logistique en fonction des traitements.

Tableau 13: Périodes optimales de semis du maïs assurant 80 % de satisfaction de ses besoins en eau dans la zone écologique du Centre Sud Sénégal.

Tableau 14: Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé dans l'expérience en lysimètres.

Tableau 15: Composition chimique des émondes de *G. sepium* et de *S. siamea* utilisées dans l'expérience en lysimètres.

Tableau 16: Variation spatiale du rendement du maïs en culture d'homogénéisation précédant la mise en place de l'essai de culture en couloirs.

Tableau 17: Matière sèche (MS), excès isotopique (E %), N total (N plante), Ndff et CRU de l'engrais en lysimètres.

Tableau 18: Matière sèche (MS), excès isotopique (E %), N total (N plante), Ndff et CRU de l'engrais pendant les hivernages 1994 et 1995.

Tableau 19: Comparaison des rendements de maïs, à surfaces emblavées égales, entre la culture en couloirs et la culture pure de maïs

Tableau 20: Rendement de MS de G. sepium et du maïs et Indice de Surface Equivalente (ISE) calculés à partir du rendement total (essai au champ, années 1994 et 1995).

Tableau 21: Valeurs A (As), du sol+émondes (As+e) et des émondes (Ae) en lysimètres.

Tableau 22: Valeurs A (As), du sol+émondes (As+e) et des émondes (Ae) au champ pendant les hivernages de 1994 et 1995.

Tableau 23: Pourcentage et quantité de N provenant de l'engrais (Ndff), du sol (Ndfs) et des émondes (Nfde) dans les parties aériennes de la plante en lysimètres.

Tableau 24: Pourcentage et quantité de N provenant de l'engrais (Ndff), du sol (Ndfs) et des émondes (Nfde) dans les parties aériennes de la plante au champ pendant les années 1994 et 1995

Tableau 25: Comparaison du CRU de l'engrais et du CRU des émondes en lysimètres et au champ.

Tableau 26: Contribution de la fixation de N_2, via les émondes, de *G. sepium* à l'alimentation azotée du maïs.

FIGURES

Figure 1: Carte des isohyètes correspondant à la période 1950-1967 (Janvier-Décembre)

Figure 2: Carte des isohyètes correspondant à la période 1970-1987 (Janvier-Décembre)

Figure 3: Analyse fréquentielle des pluies (série 1950-1993) au seuil de probabilité à p > 0,2 (- - -); p > 0,5 (---) et p > 0,8 (———). Positionnement des hivernages 1994 et 1995 par rapport aux valeurs seuils.

Figure 4: Répartition des surfaces cultivées en céréales au Sénégal en 1995.
(Source : Ministère de l'Agriculture - 1995).

Figure 5: Répartition de la production céréalière au Sénégal.
(Source : Ministère de l'Agriculture - 1995).

Figure 6: Evolution des surfaces emblavées en maïs au Sénégal entre1981 et 1994 au Sénégal.
(Source : Ministère de l'Agriculture, Direction des Statistiques Agricoles).

Figure 7: Evolution des rendements moyens de maïs entre 1981 et 1994 au Sénégal.
(Source : Ministère de l'Agriculture, Direction des Statistiques Agricoles).

Figure 8: Pourcentage de NO3 dans N minéral selon le traitement.

Figure 9: Dynamique de minéralisation de N (NO3, NH4 et NO3 + NH4) pour le traitement témoin (sans émondes).

Figure 10: Minéralisation *in vitro* de N des émondes de *Gliricidia sepium* et de *Senna siamea.*

Figure 11: Evolution *in vitro* des quantités de CO_2 dégagées au cours de l'incubation..

Figure 12: Cinétique de biodégradation (CO_2 dégagé) *in vitro* des émondes de *Gliricidia sepium* et de *Senna siamea.*

Figure 13: Pluies pentadaires à Nioro du Rip en 1995 et seuil minimum des pluies survenant 8, 5 et 2 années sur 10 pendant la pentade concernée (analyse de la période 1950-1995).

Figure 14: Cinétique de biodégradation des émondes de *Gliricidia sepium* au champ.

Figure 15: Cinétique de minéralisation de N des émondes de *Gliricidia sepium* au champ.

Figure 16: Evolution de la matière sèche des parties aériennes du maïs au cours du cycle.

Figure 17: Cinétique d'absorption de N par le maïs et de minéralisation de N des émondes de *Gliricidia sepium*.

Figure 18: Synchronisation de l'offre en N des émondes et de la demande en N du maïs.

Figure 19: Taux de satisfaction des besoins en eau du maïs sur l'ensemble du cycle. Hypothèse selon la longueur de cycle (75 j ——— et 90 j ------) et la réserve utile en eau (R.U) maximale (◆ 190 et ▲ 140 mm pour 2 m de profondeur du sol).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Position du problème

En Afrique de l'Ouest, le système traditionnel de production était jadis marqué par une dominance de cultures vivrières (mil souna, sorgho, mil sanio et riz) avec des pratiques culturales manuelles et la jachère pour régénérer le sol. A partir des années 1960, on a enregistré un développement des cultures de rente comme l'arachide ou le cotonnier et un recul des cultures céréalières à cycle long tels que le sorgho et le mil. Aujourd'hui, en plus de cette évolution défavorable aux cultures céréalières, deux autres facteurs viennent affecter l'agriculture pluviale: l'un circonstanciel et naturel est la baisse alarmante de la pluviométrie ; l'autre humain et résultant de causes anciennes et à effet cumulatif, et amorcé depuis la régression de la jachère et la saturation de l'espace, est la baisse non moins alarmante de la fertilité des sols. Cette situation a occasionné un grave déficit vivrier dans la zone soudano-sahélienne qui a conduit l'Etat à réactiver les cultures vivrières afin d'atteindre un objectif d'auto-suffisance alimentaire. C'est ainsi que le Plan Céréalier du Sénégal prévoit une augmentation sensible de la production du mil-sorgho et du maïs (principales céréales vivrières) permettant de couvrir les besoins en céréales, actuellement couverts à 50 - 60 %, à 80 % vers l'an 2010. Cette augmentation se traduirait, pour la culture du maïs, par une extension (doublement des surfaces) et une intensification (accroissement de 50 % des rendements, passant d'une moyenne actuelle de 1100 à une moyenne "espérée" de 1700 kg ha^{-1}) (source: Ministère du Développement Rural du Sénégal, 1986).

Malheureusement la productivité des terres est faible en raison de la pauvreté intrinsèque du sol liée principalement à son faible taux d'argile et à la nature de celle-ci (kaolinite), en raison surtout des difficultés socio-économiques qui n'autorisent pas l'apport d'engrais en dehors des zones cotonnières. Les sols classés comme des "ferrugineux tropicaux lessivés" prédominent au Sénégal (sol "Dior" et sol "Dek"); ils ont des propriétés physico-chimiques peu favorables: structure peu développée, faible capacité de rétention en eau (R.U) et capacité cationique d'échange (C.E.C) réduite. Leur surexploitation, suite à la forte pression démographique, a favorisé la mise en culture des terres marginales jadis réservées au parcours des animaux et a entraîné l'abandon de la pratique de jachères qui remplissait un rôle restaurateur de leur fertilité. La dégradation se traduit, après 15-20 ans de mise en culture, par une baisse moyenne du taux de matière organique (C x 1.72) qui passe de 0.85 à 0.35 %, une réduction de la porosité de 15 %, un tassement des horizons de surface et une acidification des terres (Pieri, 1989).

L'équilibre du bilan des éléments nutritifs et l'accroissement de la productivité agricole peuvent être assurés par plusieurs voies. La première est la fertilisation minérale mais à laquelle s'oppose une contrainte majeure: l'impossibilité pour l'agriculteur d'accéder aux engrais principalement azotés (coût élevé et faible disponibilité). En Afrique de l'Ouest, les quantités d'engrais apportées ne dépassent guère 10 kg ha^{-1} (Gigou, 1995). Ce même constat était fait il y a 30 ans, mais les agronomes affichaient alors des projections de consommations croissantes d'engrais. A ce jour, le même constat est prononcé; on n'affiche plus des projections à 10, 20 et 30 ans de consommation d'engrais mais des prévisions de perte du capital fertilité des terres, lesquelles exprimées en équivalents engrais sont pessimistes (Van der Pol, 1992 ; Rhodes et al., 1996).

La très faible utilisation de l'engrais minéral en culture céréalière en Afrique de l'Ouest conduit les agriculteurs à rechercher d' autre sources de fertilisation ; le fumier en est une. Pour améliorer cette pratique de la fumure organique, les efforts depuis plusieurs décennies portent sur la valorisation des résidus de récolte et la matière végétale directement, ou indirectement via l'animal (animaux sédentarisés) (Hamon, 1967; 1972). Il importe cependant de ne pas oublier que la carence quasi générale en phosphore des sols sableux tropicaux rend obligatoire la fertilisation minérale phosphorique. Notons que le phosphate naturel peut être incorporé au compost (Gueye et Ganry, 1983). Malheureusement, la biomasse végétale qui faisait déjà défaut, fait de plus en plus défaut! Allard et al. (1983) ont ainsi montré la faible disponibilité des résidus de récolte (1 à 3 t ha^{-1}) pour faire du compost ou du fumier. Badiane (1993) montre en zone Centre Nord Sénégal, dix années après Allard et al. (1983), que cette disponibilité est toujours aussi faible, voire inférieure. Près de 60 % des parcelles paysannes ne reçoivent environ que 1 t ha^{-1} de fumier et seulement 40 % des parcelles reçoivent des doses comprises entre 2 et 4 t ha^{-1}. Cet auteur montre également qu'une partie importante des déjections est utilisée comme combustible, ce qui est un indicateur pertinent de la raréfaction de la ressource en bois.

En dehors des zones cotonnières, le constat que nous venons de dresser est alarmant pour le Sénégal, mais il peut être généralisé à l'ensemble des systèmes agraires sous les tropiques semi-arides et arides au sud du Sahara. Dans ces zones, on assiste au développement de la culture attelée, donc, de la production de fumier, mais ce sont les plantes fourragères qui font défaut (Sanogo, 1997).

Le question concrète qui se pose est: comment concevoir un système de production à base de céréale qui soit productif, durable et compatible avec des ressources en baisse et des objectifs de production en hausse? C'est un véritable défi que les agronomes doivent relever. Pour ce faire, à l'instar de nombreux auteurs (Kang et al., 1984; Rachie, 1983; Yamoah et al., 1986 a; 1986 b; MacDicken,

1990; Jama et Gehutan, 1991; Rosecrance et al., 1992; Xu et al., 1993 a; 1993 b) nous pensons que la seule voie réaliste qui s'impose est une voie d'intensification biologique basée sur l'agroforesterie et sur le recyclage des résidus de récolte en relation avec la sédentarisation du bétail. C'est pourquoi nous passerons en revue les principaux systèmes de culture incluant l'arbre pour ensuite proposer un système de culture à base de maïs fondé sur l'agroforesterie. Deux systèmes de culture sont prédominants en zone soudano-sahélienne: la culture avec jachère (espace non saturé) et la culture sous parcs à arbres (espace souvent saturé).

Analyse chronologique des systèmes agro-sylvo-pastoraux

La jachère

Les agriculteurs avaient pu maintenir un certain équilibre agro-écologique, grâce à l'assolement et à la rotation incluant la jachère de longue durée (5 à 10 ans), grâce aussi à la protection des arbres champêtres sur le terrain et à la présence d'un cheptel de bovins conduits au champ pour consommer le fourrage et fournir la matière organique (Peltier et Eyog-Matig, 1988). Cet équilibre avait donc pu être maintenu grâce à une "cohabitation" entre les arbres et les cultures céréalières: mil, sorgho, sanio, mais et riz. Cet équilibre fut rompu lorsqu' un certain seuil de population fut dépassé. Il existe, en effet, un seuil de population au delà duquel la jachère est mise en culture, faute de pouvoir poursuivre l'extension du territoire défriché. Ce seuil est fonction du rapport SAU sur ST et des ressources naturelles en biomasse, principalement en bois: il est donc lié à la zone écologique (Pieri, 1989). De nombreux auteurs soulignent que ces seuils sont dépassés dans la plus grande partie du Centre Sud du Sénégal avec des densités de 80 à 100 habitants au kilomètre carré (Pelissier, 1966; Lericollais, 1972; Gastellu, 1981). Selon l'analyse théorique faite par Pieri (1989), dans une région où presque tout l'espace est cultivable (SAU / ST = 80 %), la densité supportable oscille entre 40 et 50 hab. / km² et devrait se situer entre 15 et 20 hab. / km² si seulement 30 % des terres étaient cultivables. Ces seuils, certes théoriques, à partir desquels régresse la jachère, sont largement dépassés dans la plupart des situations des terres de savanes, du Bassin Arachidier du Sénégal au Nord Cameroun, en passant par le Plateau Mossi et le sud du Mali (Pieri, 1989). Des suivis précis de terroir effectués en pays Sereer au Sénégal dans les années 60, puis dans les années 80, font très clairement apparaître (a) une diminution des jachères et de l'espace pastoral (b) une réduction de la fumure (c) une dégradation du couvert végétal et, notamment, de *Faidherbia albida* dont les effets régénérateurs sont d'une grande importance pour la fertilité des sols (Lericollais et Milleville, 1991).

Les agriculteurs, conscients du rôle joué par l'arbre dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux, ont pu conserver des parcs à arbres de certaines espèces à usages multiples ; ces parcs sont des "rescapés"

de la déforestation due aux effets conjugués de la culture attelée ou mécanisée et de l'exploitation abusive de l'arbre pour la production de bois afin de satisfaire les besoins énergétiques des villes.

Les parcs à arbres

En Afrique de l'Ouest, les parcs arborés les plus importants sont ceux que l'on retrouve dans la bande soudano-sahélienne dont les espèces constituantes ont été plus ou moins naturellement sélectionnées *(Lannea microcarpa, Cordyla pinnata)* ou introduites *(Faidherbia albida)* pour leur utilité.

Le parc à karité (*Vitellaria paradoxa*)

Le parc à karité, contrairement au parc à *Faidherbia albida*, se retrouve dans toute l'Afrique de l'Ouest jusque dans les villages d'agriculteurs dans le Nord Cameroun (Baumer, 1994). Dans ce type de parc, la fertilisation du sol cultivé est assurée par un apport de fumier, au moins dans les champs de cases, produit par les troupeaux des agriculteurs ou des éleveurs transhumants avec qui l'agriculteur a pu passer un contrat lui assurant du fumier, généralement en échange de grains et / ou de fourrage sur les chaumes, voire contre un payement en argent (Baumer, 1994). La culture vivrière dominante entre les karités est le mil suivi du sorgho. Les cultures de rente sont l'arachide et le cotonnier. Les parcs à karité n'existent pas à l'ouest du fleuve Sénégal; ils sont interrompus ailleurs et relayés vers le nord par des parcs d'autres espèces. Les parcs à karité constituent un type de végétation caractéristique du Mali et du Burkina Faso.

Le parc à *Faidherbia albida*

L'absence de *F. albida* dans la plupart des terroirs des régions soudaniennes est due à la violence des feux de brousse et à la forte concurrence herbacée dans les parcs (Harmand, 1989).
Au Sénégal, pour compenser la baisse progressive de la fertilité du sol due aux exportations et à la lixiviation, les cultivateurs, conscients de l'intérêt de *F. albida* ont conservé une agriculture traditionnelle dans laquelle la protection et l'installation de l'arbre se sont effectuées sans une géométrie particulière. En effet, sous couvert de *F.albida*, le taux de matière organique et celui de l'azote total, respectivement, peuvent atteindre 1.5 % et 0.08 % et descendre sous culture à 0.5 % et 0.03 % (Charreau et Vidal, 1965). Dans ce système, *F.albida*, grâce au cycle biogéochimique, recycle les éléments minéraux ; de plus, cet arbre produit du fourrage pour les animaux qui le restituent indirectement sous forme de fumier (Duhoux et Dommergues, 1985).

Dans les parcs, *F. albida* est souvent mélangé avec d'autres espèces. Marchal (1980), dans une étude faite sur le parc à *F. albida* au sud du Burkina Faso, sur 679 arbres repartis sur 87 ha cultivés, a trouvé 55 % de *F. albida*, 15 % de *Balanites aegyptiaca*, 10 % de *Paupartia birrea*, 4 % de *Tamarindus indica*, 3.5 % de *Lannea macroptera*, 3 % d'*Acacia nilotica*, 1.5 % d'*Acacia radiana* et 1.5 % de *Ficus gnaphalocarpa*.

En Afrique de l'Ouest, on retrouve d'autres parcs arborés (Baumer, 1994).

Autres parcs arborés

Ces parcs sont moins étendus que ceux décrits ci-dessus et se trouvent isolés dans quelques endroits en Afrique de l'Ouest:

-parc à *Cordyla pinnata* (dans la région du Sine-Saloum au Sénégal);

-parcs à *Parkia biglobosa* où les espèces de *P. biglobosa* sont souvent mélangées avec celles de *F. albida* (surtout au Sénégal) et de Karité (surtout au Mali);

-parcs à Baobab: *Andansonia digitata*, notamment au Sénégal, sous lesquels le pâturage est plus répandu que la culture;

-parcs à rônier: *Borassus aethiopum*, notamment au nord de Kaolack (Sénégal);

-parcs à palmier à huile : *Elaeis guineensis*, rencontrés en Casamance au Sénégal, à Adioukrou en Côte d'Ivoire, à Bassa au Cameroun ou en pays Ibo au Nigéria.

La régénération de ces parcs était assurée grâce à l'entretien et à la protection des jeunes pousses au cours des opérations culturales qui étaient exécutées manuellement. Aujourd'hui, il se pose le problème très aigu du maintien et du renouvellement des arbres dans les parcs en cohabitation avec les cultures vivrières ; la régénération naturelle n'est plus assurée car les jeunes pousses sont envahies par les mauvaises herbes ou détruites lors des opérations culturales; en plus, la régénération artificielle n'est pas effectuée par des plantations. En effet, dans une agriculture en voie d'intensification où le travail manuel doit céder progressivement la place à la traction animale d'abord (situation actuellement prédominante au Sénégal) et à la traction motorisée ensuite, il devient évidemment difficile de concevoir des champs parsemés d'obstacles naturels (Dancette et Niang, 1979). L'élimination ou la dégradation de la régénération de l'arbre, quelles qu'en soient les origines, compromettent le devenir des parcs. Pour le moins, elles diffèrent leur renouvellement (Depommier, 1996). Les systèmes de culture actuels en espace saturé sont à l'origine d'une perte importante et irrémédiable de biodiversité qui s'aggrave au cours du temps (le nombre d'espèces végétales et animales diminue). Parallèlement, on note une diminution de l'activité biologique des sols suite à leur défrichement et à la baisse de leur taux de matière organique (Ruellan, 1993). Il y a donc lieu de

redonner à l'arbre une place plus importante dans les systèmes de culture actuels.
Dès lors, la disposition régulière dans les champs, d'arbres à ombrage léger pendant la saison de culture, sans racines latérales superficielles pouvant concurrencer celles des cultures, produisant un fourrage de qualité et fixateurs de N_2, serait une technique conservatrice des avantages de la jachère forestière tout en autorisant les pratiques culturales avec un minimum d'intrants extérieurs à l'exploitation. C'est le but recherché par l'agroforesterie et plus précisément par la culture en couloirs.

L'introduction de la légumineuse arbustive fixatrice de N_2 dans les systèmes de culture à base de maïs

Comme nous venons de le voir, l'agroforesterie est une tentative d'optimisation de l'utilisation des avantages écologiques et économiques des espèces ligneuses pérennes dans les systèmes de culture (F.A.O., 1984). Les systèmes agroforestiers tropicaux sont nombreux et variés. Ils ont été classés par Nair (1989) en douze types principaux que l'on peut regrouper en six modalités en fonction de leur principale orientation productive (agro-pastorale ou forestière) ou économique (vivrière ou commerciale), dans la mesure où ces facteurs sont stratégiques pour leur application aux projets de développement. En ce qui concerne les systèmes vivriers, Puig et al. (1993) ont distingué les associations permanentes stables de celles qui relèvent de l'agriculture sur brûlis, base essentielle de la productivité céréalière dans les zones tropicales humides. Parmi ces associations stables dans le temps, Puig et al. (1993) ont distingué trois types: (i) celles où les herbacées ombrophiles sont cultivées sous couvert arboré (ii) la culture en couloir (iii) les autres systèmes héliophiles utilisant l'arbre comme source d'intrant mais dans un arrangement spatial disjoint.
Dans notre cas, nous nous intéressons à la culture en couloir où la culture vivrière et la jachère arborée (dispositif permanent de recyclage des nutriments lixiviés) sont superposées en un arrangement temporel permanent plutôt que séquentiel (Combe, 1982).
Pour inciter les agriculteurs des zones tropicales semi-arides à adopter l'agroforesterie, les chercheurs doivent résoudre quatre grands problèmes:

- le maintien de la fertilité du sol et la fertilisation;
- la production de bois et sous-produits (fruits et pharmacopée);
- la production de fourrage;
- le rôle foncier de l'arbre.

Ces problèmes doivent être abordés selon une démarche scientifique qui permet de déboucher sur des références techniques locales adaptées aux situations spécifiques de la zone considérée. Pour cela, l'ICRAF (International Council for Research in Agroforestry) a proposé la méthode D & D (Diagnostic and Design) de diagnostic et de conception de systèmes agroforestiers en quatre phases

(Raintree, 1987): (1) une phase d'enquêtes de prédiagnostic pour identifier les facteurs de production, leurs limites et les interactions entre les composantes des différents systèmes d'utilisation de la terre; au cours de cette phase des propositions d'interventions agroforestières sont élaborées (2) une phase de conception et d'évaluation des technologies proposées en vue d'élaborer des programmes de recherche à court, moyen et long terme (3) une phase de mise en place des essais (4) des enquêtes sur la vulgarisation et l'évaluation des résultats.

Ces différentes phases, assez rapides et itératives, sont à prolonger dans le temps, si l'on veut un système agroforestier adapté et durable. Pour revenir au Sénégal, un programme national de recherche en agroforesterie est mis en place dans ce pays depuis plus de dix ans (annexe 1) et s'inspire de cette méthode D & D. Dans ce programme, la "culture en allées" est une des propositions d'interventions agroforestières issues de la phase (1) et qui se situe au niveau de la phase (3) de la méthode D & D ; elle fait l'objet du présent travail. Pour la mise en oeuvre d'une pratique agroforestière, quelle qu'elle soit, en zone tropicale semi-aride, la Recherche doit orienter ses travaux impérativement dans les trois directions suivantes:

- (a) la maîtrise de l'eau, de l'érosion et de la fertilisation;
- (b) la maîtrise des transferts d'azote;
- (c) le contrôle de l'allélopathie, des maladies et des parasites.

Notre travail se réfère aux points (a) et (b). Dès lors, il importe de connaître le rôle de l'arbre dans les transferts d'azote à l'intérieur du système agroforestier, en l'occurrence la culture en couloirs. Dans ce système, la fixation de N_2 et la biodégradation des émondes sont des processus majeurs du cycle de l'azote que nous allons analyser. La représentation simplifiée de Young (1995) du cycle de l'azote est conforme au système que nous étudions et fait ressortir la primauté de ces deux processus (schema 1). Dans ce système, la biomasse foliaire de l'arbre constitue la principale source d'approvisionnement du pool d'azote mobilisable du sol, en dehors de la biomasse souterraine (racines) étant donné que les résidus culturaux sont presque inexistants et les quantités d'azote minéral apporté (engrais et fumier) sont faibles.

Objectifs, démarche et plan de l'étude

Notre objectif est de développer un système agroforestier dans lequel, l'arbre fixateur de N_2, via les émondes, est utilisé comme alternative à l'engrais pour la fertilisation azotée de la céréale.

La démarche scientifique suivie dans notre étude peut se résumer en trois étapes:

- une première phase de diagnostic en milieu réel de la fixation réelle de N_2 (FRN) à l'échelle du pays, selon un gradient écologique dans une zone donnée en vue de déboucher sur des moyens à mettre en oeuvre pour l'améliorer;

- une phase reproductive de caractérisation en milieu contrôlé (en laboratoire) ou semi-contrôlé (en lysimètres) de l'offre en azote des émondes et de leur contribution à l'alimentation azotée de la céréale;

- une phase de retour en milieu réel qui se réalise au champ, à l'échelle d'une parcelle. Dans cette phase, on tente d'analyser le fonctionnement du système "arbre-sol-plante" et de raisonner les pratiques culturales en vue d'assurer la synchronisation entre l'offre en azote des émondes et la demande en azote du maïs. Cette troisième phase conduit à la définition d'éléments de modélisation en vue d'aboutir, dans une quatrième phase (non traité dans cette étude) à des traitements ou pratiques susceptibles d'être réalisés par quelques agriculteurs.

Le plan de notre étude comprend donc trois parties:

- la première partie (chapitre III) des travaux comporte une évaluation de la fixation réelle de N_2 (FRN) de plusieurs légumineuses arbustives poussant naturellement dans trois écosystèmes du Sénégal. La méthode utilisée dans cette évaluation est la technique d'abondance isotopique naturelle ^{15}N ($\delta\ ^{15}N$);

- la deuxième partie (chapitres IV et V) des travaux est consacrée à l'étude de la cinétique de biodégradation d'émondes de *Gliricidia sepium* et de *Senna siamea* dans un sol soumis à différentes humidités en conditions contrôlées et au champ pour *G. sepium*, et à l'étude de synchronisation entre l'offre en azote des émondes et la demande en azote du maïs en conditions de culture pluviales au champ. Pour ce faire, des modèles (i) de biodégradation et libération d'azote (ii) et d'optimisation des dates de semis et d'émondage, sont mises en oeuvre dans cette partie;

- la troisième partie (chapitre VI)des travaux concerne l'étude de transferts d'azote dans le système "arbre-sol-plante" avec l'utilisation de l'isotope ^{15}N comme traceur permettant de quantifier en fin de cycle cultural les contributions du sol, de l'engrais azoté et des émondes à l'alimentation azotée du maïs. Les travaux sont conduits en conditions semi-contrôlées dans des lysimètres en conditions de culture pluviale au champ.

Notre conclusion fait ressortir les aspects novateurs d'ordre écologique (traités en première partie), met l'accent sur le domaine de validité des modèles et des indicateurs proposés (traités en deuxième partie), fait ressortir en quoi le système proposé accroît l'efficience biologique d'utilisation de la terre (ISE) et contribue à la durabilité du système céréalier grâce à la fixation de N_2 (traités en troisième partie).

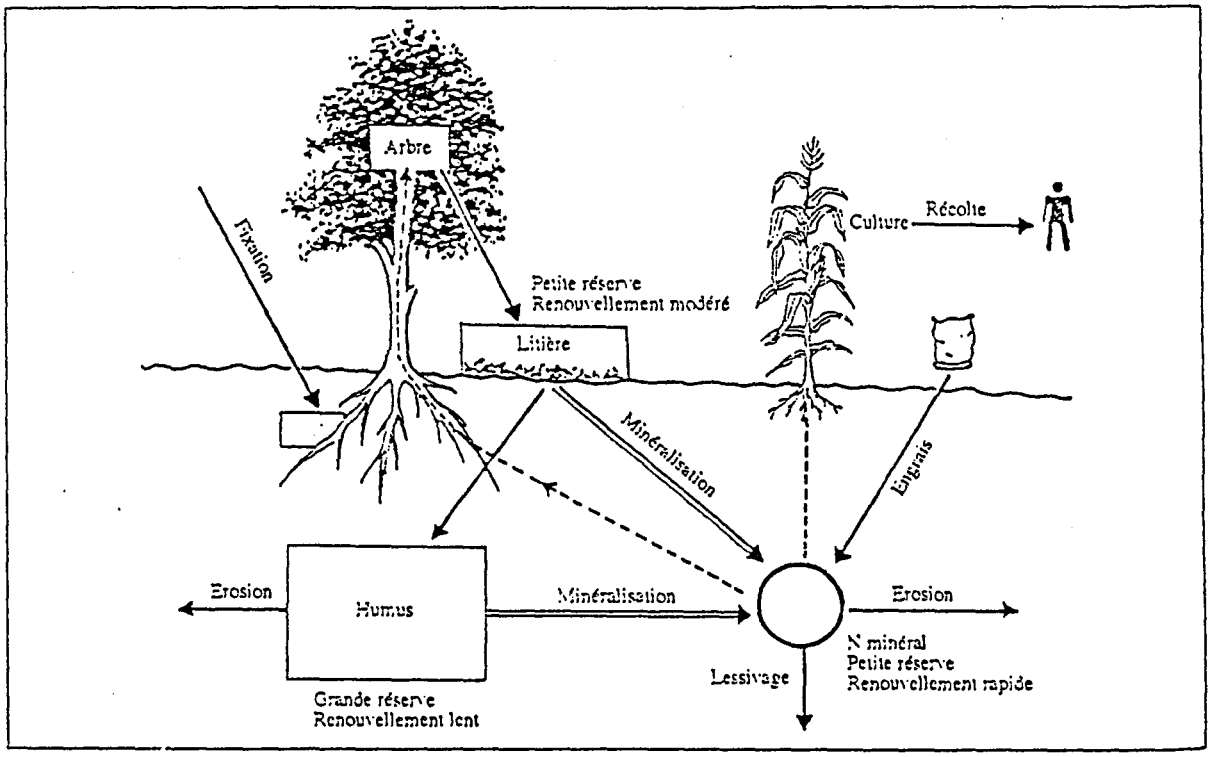


Schéma : Cycle de l'azote en agroforesterie, simplifié pour montrer les resserves et les flux principaux (d'après Young, 1995)

CHAPITRE I.
CADRE GÉNÉRAL DE L'ETUDE

CADRE GÉNÉRAL DE L'ETUDE

1.1. Le milieu: climat-sol-végétation

1.1.1. Climat

Le climat du Sénégal est caractérisé par l'existence de deux saisons très contrastées :

-une courte saison des pluies monomodale de 2 à 5 mois du nord au sud avec des précipitations maximales en août; de la zone centre à la zone centre sud ,80 % des pluies sont concentrées sur une période de 3 mois (juillet, août et septembre) ; elle est marquée par des périodes de sécheresse fréquentes de début de cycle et par des pluies érosives de par leur très forte intensité; ce régime pluviométrique conduit à un bilan hydrique des cultures souvent déficitaire ;

-une longue saison sèche continue, pendant laquelle les résidus végétaux et adventices sont utilisés par les hommes et les animaux ou détruits par des feux de brousse laissant en place une végétation arborée de plus en plus clairsemée en fin de saison sèche.

A ces contrastes intra annuels, s'ajoute une variabilité interannuelle des précipitations tant au niveau de la hauteur des précipitations qu'au niveau de la répartition des pluies en cours d'hivernage. La température moyenne annuelle de 30 °C est élevée avec des variations importantes entre les maxima et les minima (maximum de 40 °C en avril-mai ; minimum de 15 °C en janvier-février). En saison sèche, les écarts entre les températures nocturnes et diurnes sont élevés. L'humidité de l'air est sujette à des fluctuations importantes au cours de l'année, 30 à 35 % en saison sèche et 70 à 90 % en saison des pluies. La durée d'insolation est en moyenne de 3000 heures par an et varie en fonction de l'année ; elle est très forte en saison sèche: 300 heures par mois, faible en saison des pluies: 200 heures par mois; ces variations sont surtout dues à l'ennuagement. L'évaporation PICHE, forte en saison sèche (plus de 10 mm par jour) est faible en saison des pluies (2 à 3 mm par jour). Le régime des vents est celui des alizés qui est dominant avec des vents secs continentaux venant du nord et du nord-est en saison sèche apportant les poussières (harmattan, vent de sable) ; les vents humides venant de l'ouest et du sud en hivernage sont liés à l'arrivée du Front Intertropical (FIT). En saison sèche, la partie occidentale reçoit des influences maritimes tandis que les parties centrales et orientales sont caractérisées par un régime de vents de type continental.

Le climat est marqué par une dégradation des conditions pluviométriques depuis deux décennies; en effet, les isohyètes de la période 1970 - 1987 (fig.2) sont significativement inférieurs à ceux de la période 1950 - 1967 (fig.1).

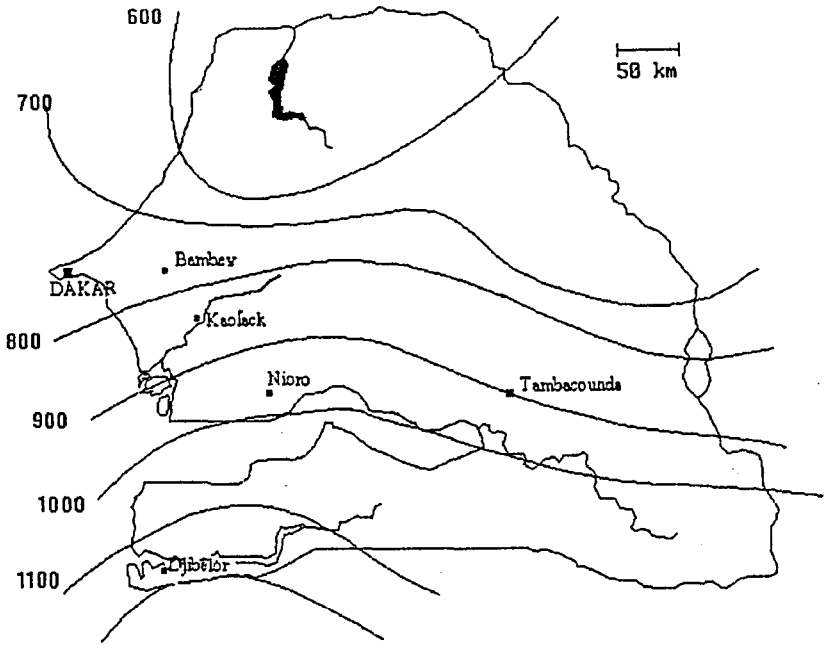


Figure 1 : Carte des isohyètes correspondant à la période 1950 - 1967 (Janvier-Décembre)

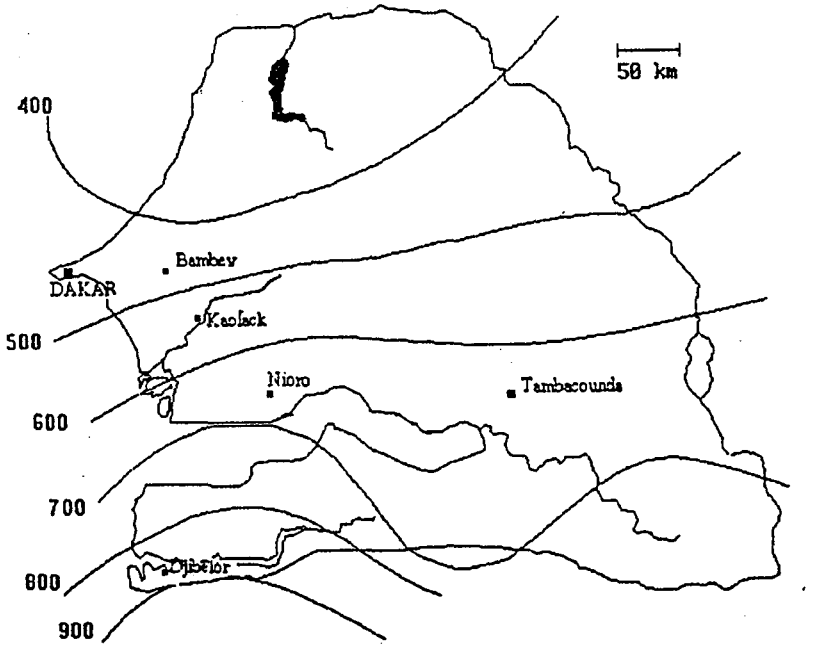


Figure 2: Carte des isohyètes correspondant à la période 1970 - 1987 (Janvier - Décembre)

Pour une meilleure gestion du caractère très erratique des précipitations, les bioclimatologistes ont, à partir des données collectées depuis 45 années, développé des outils prévisionnels permettant de déterminer la probabilité d'avoir une année pluvieuse 2, 5 et 8 années sur 10 (fig.3a, 3b et 3c). Ces figures permettent d'accroître les chances de réussite des productions au sud (Ziguinchor), au centre sud (Nioro) et au centre nord (Bambey) et offrent la possibilité de classer les années d'expérimentation dans les probabilités ainsi définies pour les différentes zones. Les années 1994 et 1995 ont donc été, selon ces courbes, dans les cas des pluviométries favorables 5 et 8 années sur 10 sur l'ensemble de l'hivernage, avec toutefois des variations intra-annuelles, selon les décades (fig. 3a, 3b et 3c).

1.1.2. Sols

Au Sénégal, on estime à 3.8 millions d'hectares la totalité des terres arables (superficie totale = 19.7 millions d'hectares) pour une superficie cultivée de 2.4 millions d'hectares.
Dans le Sine Saloum, principale zone d'étude, les sols cultivés dominants sont des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés (environ 80 % des surfaces cultivées) (Charreau et Nicou, 1971). Ils sont développés sur du sable quaternaire d'origine fluviale et marine qui a subi par la suite des actions éoliennes (relief dunaire).

1.1.3. Végétation du Centre Sud Sénégal

Le paysage végétal du Sénégal varie considérablement du nord au sud, en fonction du gradient de pluviométrie (200 à 1200 mm) et de la durée de la saison des pluies (2 à 5 mois). On passe ainsi progressivement de la steppe à épineux au nord, à la savane à Combrétacées au centre et à la forêt claire à *Daniella oliveri* au sud.
Sur les terrains de culture, les agriculteurs conservent généralement des essences forestières pour la production de fruits et de bois ou des parcs arborés tels que les parcs à *Cordyla pinnata* au centre sud (principale zone d'étude). Lorsque le terrain est abandonné en friches, il est d'abord colonisé par une végétation herbacée avant d'avoir un aspect buissonnant. Quelques zones à végétation naturelle sont reliées à des bandes herbacées en jachères réservées à la divagation du bétail en hivernage.

1.2. Situation maïsicole au Sénégal

En 1995, le maïs a occupé la troisième place (8.4 %) derrière le sorgho (11.2 %) et le mil (73.9 %) des surfaces cultivées en céréales (fig.4) mais sa production demeure faible (11.5 %) comparée à

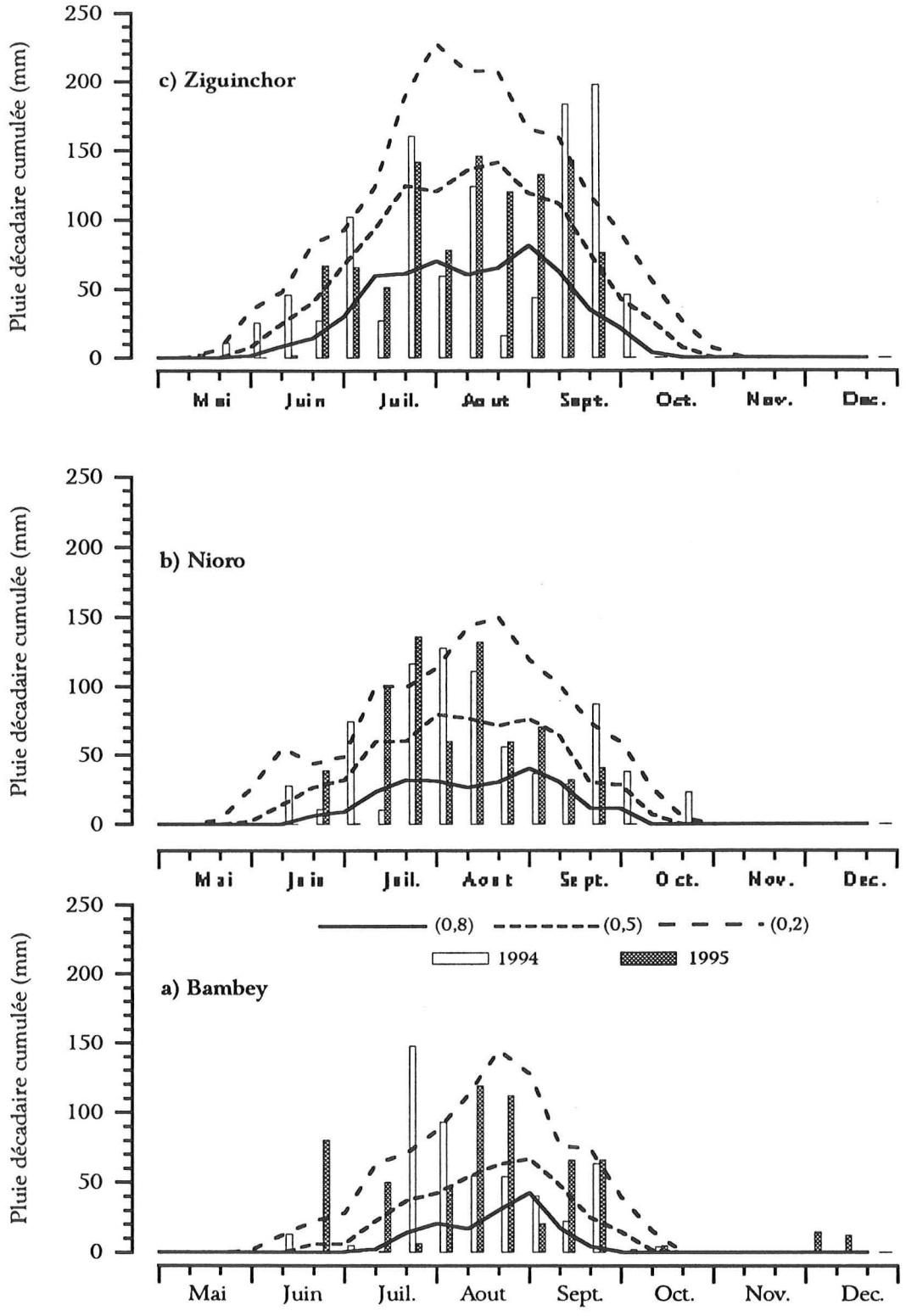


Figure 3: Analyse fréquentielle des pluies (série 1950 - 1993) au seuil de probabilité p>0.20 (- - - -), p > 0.50 (-------) et p> 0.80 (——).
Positionnement des hivernages 1994 et 1995 par rapport aux valeurs seuils.

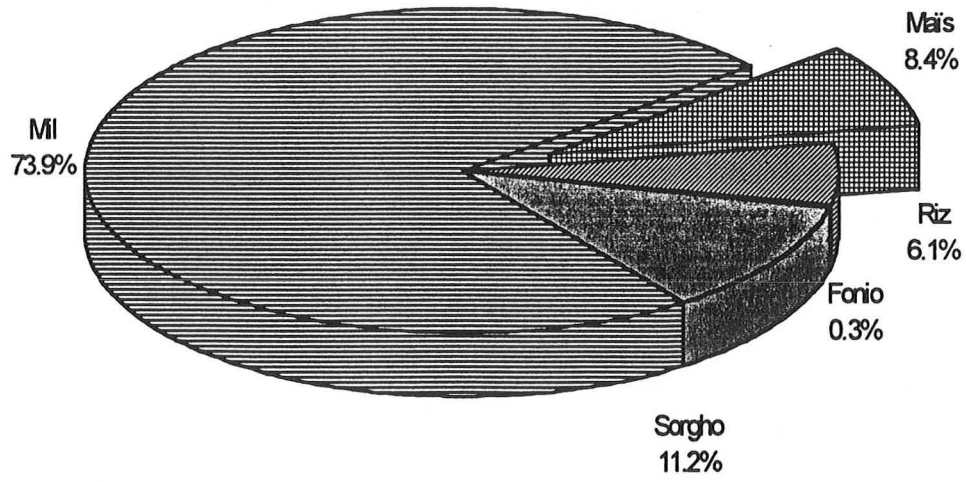


Figure 4: Répartition des superficies emblavées en céréales au Sénégal en 1995.
(Source : Ministère de l'agriculture - 1995)

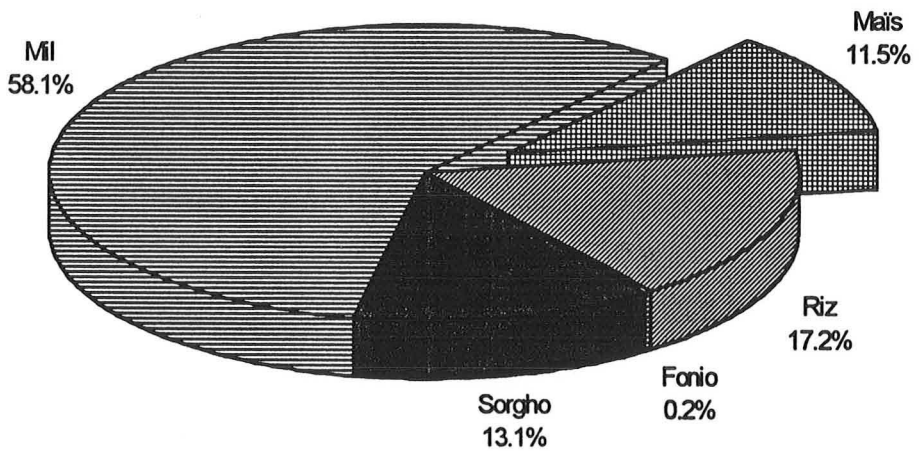


Figure 5 : Répartition de la production céréalière au Sénégal en 1995.
(Source : Ministère de l'agriculture - 1995)

celles des autres céréales (fig.5)

Le maïs est cultivé au Sénégal dans la partie méridionale du pays au sud de l'isohyète 500-600 mm. Il présente un intérêt vivrier pour les populations rurales car il est consommé dès les premiers jours de septembre en épis grillés à une époque où la "soudure" est défectueuse (il s'agit du maïs des champs de case) et le reste de l'année en bouillie et couscous. Il a longtemps été considéré comme une céréale de soudure. Cette situation a fait que les surfaces emblavées en maïs sont restées longtemps stables. Cependant ces 15 dernières années (1981-1995), les superficies de maïs sont passées de 58 000 à 140 000 hectares (fig.6). Dans la zone du Sine Saloum, principale zone d'étude, le maïs est cultivé principalement sur les sols "Dek" (ferrugineux tropicaux à forte tendance hydromorphe) ou "Dek-Dior" (ferrugineux tropicaux à faible tendance hydromorphe). Pendant la campagne 1994/1995, cette région a représenté 67732 hectares pour une production de 70152 tonnes, soit 13 % des surfaces cultivées et 18 % de la production en céréales à l'échelle nationale ; elle a représenté, pour la même campagne agricole, 63 % des superficies totales et 65 % de la production totale en maïs au niveau national. C'est dire l'importance du maïs dans cette région.

Malgré l'importance relative des superficies emblavées en maïs à l'échelle nationale (fig. 6), même si la production annuelle a augmenté de 78 000 tonnes en 1981 à 110 000 tonnes en 1995, les rendements obtenus par les agriculteurs sont de l'ordre de 1 000 kg ha^{-1} (fig. 7); ils sont faibles par rapport au rendement maximum atteint dans la zone (3000-4000 kg ha^{-1}) montrant à quel point les contraintes peuvent encore entraver l'intensification de la culture du maïs. Parmi les principales contraintes nous citerons les variétés mal adaptées, le parasitisme, l'enherbement et le manque d'engrais lié au faible revenu des exploitants.

L'augmentation de la productivité du maïs demande par conséquent une amélioration des systèmes de culture qui soit à la portée des paysans.

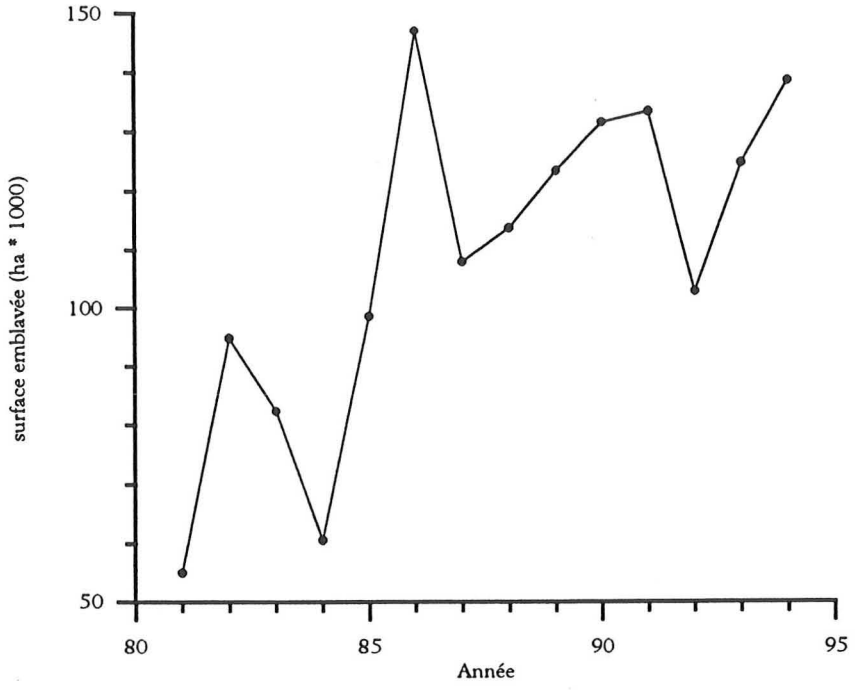


Figure 6 : Evolution des superficies emblavées en maïs au Sénégal entre 1981 et 1994.
(Source : Ministère de l'Agriculture, Direction des Statistiques Agricoles).

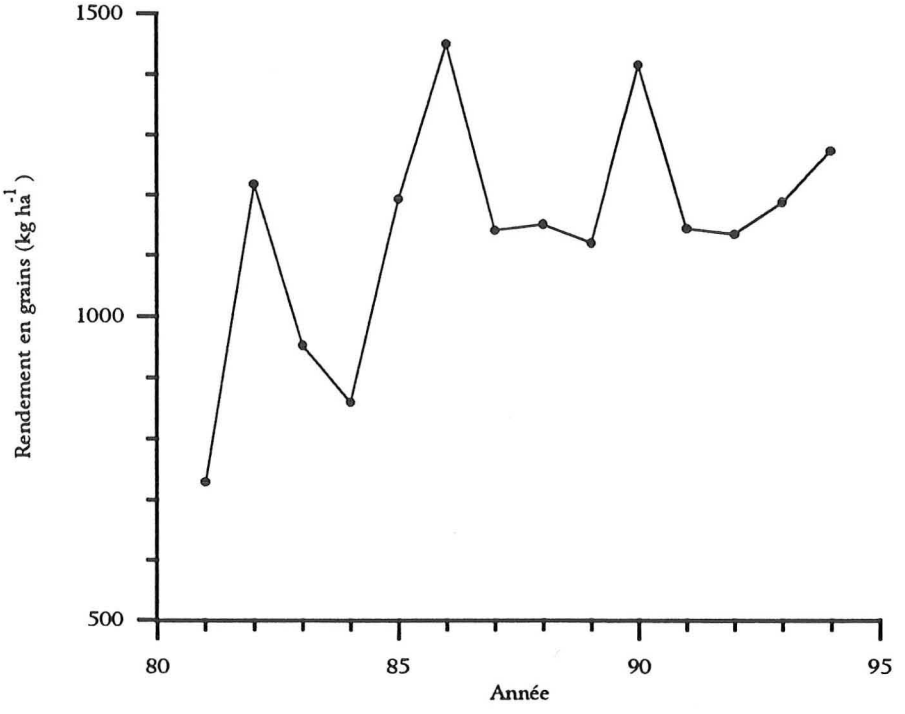


Figure 7 : Evolution des rendements moyens du maïs au Sénégal entre 1981 et 1994
(Source : Ministère de l'Agriculture, Direction des Statistiques Agricoles).

CHAPITRE II
TECHNIQUES ET MÉTHODES

II. TECHNIQUES ET MÉTHODES

2.1. Techniques expérimentales

Nos expériences ont porté sur quatre niveaux d'échelle (a) petite région ou terroir (b) parcelle en station (c) lysimètres (d) laboratoire. Pour le niveau (a) la technique est celle de prélèvement et d'échantillonnage par espèce; pour le niveau (b) les techniques sont celles de l'essai en blocs et celle de l'essai en "bandes"; pour le niveau (c) la technique est celle de la lysimétrie: vingt lysimètres sont disposés en randomisation totale ; pour le niveau (d) la technique est celle de l'incubation dans des godets disposés en randomisation totale.
Les descriptions précises des techniques expérimentales seront présentées lors de la présentation des résultats des essais.

2.2. Techniques analytiques

2.2.1. Dosages chimiques

En ce qui concerne les plantes, le dosage de l'azote est fait par minéralisation Kjeldhal (avec réduction des nitrates), entraînement à la vapeur et dosage en retour après piégeage de l'acide en excès. Pour éviter les pollutions, une unité d'entraînement tout verre est utilisée et un rinçage abondant au méthanol entre les séries d'échantillons est effectué. Les analyses sont effectuées au laboratoire du CIRAD de Montpellier (France) et au laboratoire de l'ISRA de Bambey (Sénégal).

En ce qui concerne les sols, la majeure partie des analyses sont réalisées au laboratoire central d'analyses "sol - eau - plante" de l'ISRA de Bambey (Sénégal). Les techniques d'analyse utilisées dans ce laboratoire sont résumés dans le tableau 1.
Pour les dosages plus spécifiques de $C\text{-}CO_2$, $N\text{-}NH_4^+$ et $N\text{-}NO_3^-$, les analyses sont faites au laboratoire du CIRAD-CA de Montpellier (France). Le $C\text{-}CO_2$ est piégé lors de l'incubation par la soude sous forme de carbonate et dosé par titration avec de l'acide sulfurique à 0.1 N (dosage en retour). Pour les deux formes d'azote, le dosage est réalisé par colorimétrie à flux continu selon la méthode Berthelot modifiée par Fallavier après adaptation à l'alliance évolution II pour le $N\text{-}NH_4^+$ (annexe 2) et selon la méthode de Griess pour le $N\text{-}NO_3^-$ (annexe 3).

2.2.2. Dosages isotopiques

La détermination de la teneur isotopique ^{15}N est faite au spectromètre de masse à double introduction couplée à une chaîne CHN, au laboratoire du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) à Solaize (France).

2.3. Méthodes d'étude de la biodégradation des émondes

2.3.1. Au laboratoire

La biodégradation des émondes d'arbres [*Gliricidia sepium* (Jack.) Kunth ex Walp et *Cassia siamea* (Lam.) = *Senna siamea* (Lam.) H.S. Hirwin & Barneby] est appréciée par la mesure du CO_2 dégagé lors d'une incubation avec des mesures quotidiennes d'abord puis hebdomadaires par piégeage pendant 24 heures (Oliver, communication personnelle). La sommation des quantités de CO_2 produites est effectuée en affectant à une période une production quotidienne égale à la moyenne des deux déterminations qui la bornent; on obtient les équations (1) et (2) suivantes :

$$V_{t12} = \frac{V_{t1} + V_{t2}}{2} \qquad (1) \qquad Q_{t12} = (t2 - t1)\, V_{t12} \qquad (2)$$

où V_{t1} et V_{t2} sont les productions constatées sur 24 heures entre deux dates t1 et t2 et Q_{t12} la quantité de CO_2 estimée pendant la période t_1 à t_2.

A partir des données ainsi calculées, on a déterminé, en adaptant l'équation (2) ci-dessus au cas du carbone, le pourcentage apparent de minéralisation du carbone apporté par les émondes incorporées au sol. Ce pourcentage apparent de carbone dégagé dans l'atmosphère est ajusté à une équation du type Henin et Dupuis (1945):

$$C\,\% = C_1 + (C_2 - C_1)\, e^{-kt} \qquad (3)$$

Cet ajustement suppose que l'on admet une cinétique du premier ordre pour la part biodégradable (C_1-C_2) des émondes enfouies avec une erreur possible sur l'origine (C_2) puisqu'en principe la proportion d'émondes dégradées est nulle au départ.

Les coefficients K, calculés à partir ce modèle, permettent de déterminer un "temps de demi-vie" de la portion "biodégradable " des émondes apportées.
Parallèlement à la détermination du CO_2, la minéralisation de l'azote ($N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3^-$) dans le sol est appréciée par un suivi régulier des teneurs en azote minéral ($N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3^-$) du mélange "sol-émondes" par extraction à l'aide de KCl 1N et dosage en sortant une série toutes les semaines ou toutes les deux semaines selon le rythme de minéralisation observé.

Le bilan net de l'azote net ($N\text{-}NH_4^+$, $N\text{-}NO_3^-$) de l'incorporation des émondes est calculé à chaque date de mesure à partir des valeurs moyennes de la minéralisation nette du sol incubé en présence et en absence d'incorporation . Nous avons utilisé l'équation suivante :

$$QN_m\ \% = 100\ \frac{(Nmin_{ti} - Nmin_{tem})}{C_{ti}\ D_{ti}} \qquad (4)$$

QN_m % : pourcentage net de N minéralisé à partir des émondes;
$Nmin_{ti}$ et $Nmin_{tem}$: teneurs (mg kg^{-1} de terre) en N minéral du sol incubé en présence (ti) et en absence (tem) d'émondes pour chaque type d'émondes et chaque condition d'humidité;
C_{ti} et D_{ti} : teneurs en N des émondes (%) et doses (mg kg^{-1}) d'émondes utilisées.

2.3.2. Au champ

La perte de MS des émondes est calculée en ajustant la cinétique de biodégradation à une loi du premier ordre d'équation (Henin et Dupuis, 1945) :

$$Y = Y_r + (Y_0 - Y_r)\ e^{-kt} \qquad (5)$$

où Y_0= quantités initiales de produits, Y_r = quantités ou concentrations de produits "structurels" c'est dire difficilement biodégradables, $(Y_0 - Y_r)$ = quantités ou concentrations de produits biodégradables, k est une constante de biodégradation, t est le temps et e la base du logarithme naturel (e=2.718) ; t est donné en jours; k est exprimé en $jour^{-1}$.

La biodégradation est appréciée par le temps de demi-vie t obtenu par la relation suivante :

$$t = \frac{\log 0,5}{k} \qquad (6)$$

calculé à partir de l'équation: $Y = Yr + (Y_0 - Y_r)\, e^{-kt}$ en posant

$$\frac{(Y - Y_r)}{(Y_0 - Y_r)} = 0,5 = e^{-kt}$$

Ce temps de demi-vie indique le temps nécessaire pour que 50 % des émondes biodégradables de *G. Sepium* enfouies soient effectivement biodégradées.

Les quantités de N restantes dans les émondes en biodégradation sont ajustées au même modèle utilisé pour la MS des émondes pour obtenir la relation suivante :

$$QN = QN_r + (QN_0 - QN_r)\, e^{-kt} \qquad (7)$$

où QN est la quantité de N des émondes en cours de biodégradation, QN_r est celle des émondes non biodégradables et QN_0 la quantité initiale de N des émondes, les autres paramètres restant les mêmes. En dérivant l'équation (7), on obtient la fonction de libération de N des émondes ci-dessous :

$$QN' = -k\,(QN_0 - QN_r)\, e^{-kt} \qquad (8)$$

où QN' est la quantité de N libérée par la partie biodégradable des émondes, les autres paramètres restant inchangés.

L'absorption de N par le maïs en cours de cycle est empiriquement modélisée par la fonction logistique suivante (Lassus, 1987):

$$y = y_e\, (1 + e^{(a-bt)})^{-1} \qquad (9)$$

où y = quantité de N absorbé au temps t, y_e = quantité limite de N absorbable, a = constante d'intégration et b = constante de proportionnalité.

2. 4. Méthodes isotopiques de quantification des flux: fixation de N_2 et alimentation azotée du maïs

L'emploi des isotopes constitue la seule méthode directe pour mesurer la quantité ou la proportion d'un élément donné dans un engrais qui est prélevé par la plante (Guiraud, 1984). Pour l'utilisation de la méthode isotopique, il nous parait utile de rappeler les quelques définitions suivantes :

2.4.1. Définitions

Abondance isotopique désignée par A : c'est le rapport en pourcentage de l'isotope à l'ensemble des isotopes d'un même corps chimique. Pour l'azote, il vient :

$$A = 100 \frac{.^{15}N}{.^{14}N + .^{15}N}$$

Rapport isotopique désigné par R: c'est le rapport de l'effectif des molécules d'un corps simple contenant 2 isotopes à celui de ce même corps contenant seulement l'isotope le plus abondant

$$R = \frac{.^{14}N + .^{15}N}{.^{14}N + .^{14}N} = \frac{2\,A}{100 - A} \quad d'où \quad A = \frac{100\,R}{2 + R}$$

Variation naturelle d'abondance isotopique désignée par $\delta\ ^{15}N$: c'est la variation du rapport isotopique R d'un échantillon en référence à celui d'un étalon

$$\delta^{15}N = \left(\frac{R\ échantillon}{R\ étalon} - 1\right) 1000$$

Excès isotopique désigné par E % : c'est la différence entre A de l'échantillon et celui d'un étalon. Pour l'azote, l'étalon de référence est l'azote de l'air dont l'abondance isotopique est 0.3663.

E % = A - 0.3663

'Nitrogen derived from fertilizer' désigné Ndff (AIEA, 1971) : c'est le pourcentage de N dans la plante provenant de l'engrais ajouté.

Le premier paramètre à être déterminé lorsque l'on étudie l'absorption de N d'un engrais par la plante par la méthode isotopique, c'est la fraction de N dans la plante dérivée de l'engrais marqué (fNdff) qui est aussi exprimée en pourcentage (Ndff %):

$$\text{Ndff (\%)} = \frac{x}{QN}\ 100 = \frac{Epl}{E}\ 100$$

où x = quantité de N de la plante provenant de l'engrais;

QN = quantité de N total dans la plante;

Epl et E = excès isotopiques de la plante et de l'engrais.

Le Ndff permet également de calculer la fraction (fNdfs) ou le pourcentage (Ndfs %) de N provenant du sol par les relations suivantes :

fNdff + fNdfs = 1 d'où fNdfs = 1 - fNdff

Ndff % + Ndfs % = 100 d'où Ndfs % = 100 - Ndff %

Coefficient réel d'utilisation d'un engrais azoté désigné par CRU %:(Guiraud, 1984): c'est le pourcentage de N de la plante provenant de l'engrais N par rapport à la quantité de N apportée par l'engrais

$$C.R.U\ (\%) = \frac{QN\ .\ Epl}{F\ .\ E}\ 100 = \frac{QN\ .\ Ndff\%}{F}$$

où QN = quantité de N dans la plante et F = quantité de N de l'engrais ajouté.

Coefficient apparent d'utilisation de l'engrais N désigné par CAU % (Hébert, 1971): c'est la différence entre la quantité de N prélevée par les plantes sur une parcelle fertilisée (QN) et celle d'une parcelle témoin sans engrais (QN_0), divisée par la quantité de N ajoutée (F) :

$$C.A.U\ (\%) = \frac{QN - QN_0}{F}\ 100$$

La détermination du C.A.U ne nécessite donc pas l'emploi d'isotope

2.4.2. Quantification de la fixation de N_2 *in situ* par la technique d'abondance naturelle ^{15}N

La discrimination isotopique qui a lieu pendant la formation du sol fait que l'on constate une différence d'abondance isotopique naturelle ^{15}N entre l'azote du sol et l'azote de l'air. Les plantes fixatrices de N_2 manifestent un enrichissement en ^{15}N moins élevé que celui des plantes non fixatrices. On se sert de cette différence, décelable au spectromètre de masse à double introduction, pour évaluer la quantité de N_2 fixée par la plante (Bardin et al., 1977; Amarger et al., 1979 ; Khol et al, 1980). Au regard de petites variations à mesurer, pour plus de précision, on exprime l'abondance de ^{15}N d'un échantillon (échan.) en $\delta\ ^{15}N$ (excès isotopique relatif pour mille) qui est définie par l'expression suivante:

$$\delta^{15}N = 1000\ \frac{.^{14}N/.^{15}N\ (échan.)\ -\ .^{14}N/.^{15}N\ (air)}{.^{14}N/.^{15}N\ (air)} \qquad (10)$$

où $^{14}N/^{15}N$ [air] = 0.3663 et $\delta\ ^{15}N$ est toujours exprimé en parties pour mille.

Le $\delta\ ^{15}N$ de la plante de référence non fixatrice doit être le reflet de celui de N assimilé à partir du sol. La méthode isotopique ^{15}N de quantification de la fixation de N_2 est fondée sur la variation du $\delta\ ^{15}N$. Les plantes dépendantes de N du sol ont des $\delta\ ^{15}N$ reflétant ceux de l'azote assimilable du sol (Domenach et al., 1989). Par contre, les valeurs de $\delta\ ^{15}N$ des plantes cultivées sur des sols où N minéral est disponible sont diluées lorsque ces plantes fixent N_2 (Amarger et al., 1979). Ainsi l'utilisation de plantes de référence (non fixatrices de N_2) dépendantes de N du sol permet de calculer le pourcentage de N fixé par les plantes (% Ndfa) grâce à l'équation suivante (Amarger et al., 1979):

$$\%\ Ndfa = 100\ \frac{\delta^{15}N\ ref\ -\ \delta^{15}N\ fix}{\delta^{15}N\ ref\ -\ \delta^{15}N\ p} \qquad (11)$$

où $\delta\ ^{15}Nref.$, $\delta\ ^{15}Nfix.$ et $\delta\ ^{15}Np$ sont, respectivement, les valeurs de $\delta\ ^{15}N$ de la plante de référence, de la plante fixatrice de N_2 et de la plante fixatrice de N_2 poussant dans un milieu sans N minéral. Pour les prélèvements d'échantillons, les plantes de référence sont choisies proches des plantes

fixatrices de telle sorte qu'elles s'alimentent dans les mêmes pools de N du sol.

2.4.3. Méthode isotopique de quantification du pool N du sol en lysimètres et au champ : concept de valeur A (Fried et Dean, 1952)

Le concept de valeur A repose sur l'hypothèse selon laquelle lorsqu'une plante est en présence de différentes sources de N, l'absorption à partir de chacune de ces sources est proportionnelle à la quantité de N disponible dans ces différentes sources. Cette valeur A représente la quantité de N disponible dans le sol ; elle peut être calculée grâce à l'emploi du traceur ^{15}N.
Ainsi lorsqu'une quantité Q d'engrais azoté d'excès isotopique E est apportée sur un sol, la quantité de N provenant de l'engrais de la plante (fNdff) sera proportionnelle à Q et de même, celle provenant du sol (fNdfs) sera proportionnelle à A (quantité de N disponible dans le sol ou valeur A). Les coefficients de proportionnalité étant les mêmes, on peut écrire :

$fNdff = k \cdot Q$
$fNdfs = k \cdot A$

$$d'où \quad \frac{fNdff}{fNdfs} = \frac{Q}{A}$$

si QN est la quantité de N total prélevée par la plante, nous avons alors :

$$fNdff = \frac{QN \cdot Epl}{E} \quad et \quad fNdfs = QN \left(1 - \frac{Epl}{E}\right)$$

$$d'où \quad A = Q \left(\frac{E}{Epl} - 1\right) \quad ou \quad A = Q \frac{1 - fNdff}{fNdff}$$

Cette équation est très simple et ne nécessite que les mesures des excès isotopiques dans la plante (Epl) et de celui de l'engrais azoté ajouté (E), Q étant la quantité de N apportée.

2.4.4. Méthode de quantification de la contribution des émondes à l'alimentation azotée du maïs: application de la méthode de valeur A (en lysimètres et au champ).

Pour évaluer la fixation de N_2 d'une légumineuse par la méthode isotopique, Fried et Broeshart (1975) ont apporté de l'engrais marqué à ^{15}N à une dose élevée de N (Q_1) à la plante non fixatrice et à une dose faible de N (Q_2) à celle fixatrice. Nous nous sommes inspirés de cette méthode pour évaluer la contribution de N des émondes à l'alimentation azotée du maïs.

Pour pouvoir appliquer cette méthode, nous devons admettre les conditions et hypothèses suivantes:

1°/ le maïs absorbe, en absence d'émondes, N du sol et N de l'engrais dans le même rapport à partir du même pool N du sol (exprimé en unités N engrais) dans le sol

2°/ la présence d'émondes ne modifie pas la longueur du cycle végétatif, le rythme d'absorption de N en cours de cycle et la profondeur d'enracinement du maïs.

Trois sources de N contribuent à la nutrition azotée du maïs en présence d'émondes :

- N de l'engrais ajouté
- N du sol fourni par la minéralisation
- N des émondes apportées.

Sur la base du concept de la valeur A, nous pouvons écrire l'égalité des rapports suivants :

$$\frac{Ndff\ \%}{Q} = \frac{Nfds\ \%}{As} = \frac{Ndfs\ \% + Ndfe\ \%}{As+e} = \frac{Nfde\ \%}{Ae}$$

où Ndff %, Ndfs % et Ndfe % sont les pourcentages de N provenant de l'engrais ajouté, du sol et des émondes apportées ;

As, As+e et Ae sont les valeurs A du sol, du sol + émondes et des émondes;

Q est la quantité d'engrais N ajoutée.

La plante poussant sur le sol sans émondes permet de calculer la valeur du sol (As), nous avons:

$Ndff_1\ \% + Ndfs\ \% = 100$ (avec $Ndfs\ \% = 100 - Ndff_1\ \%$)

$$\text{et} \quad \frac{Ndff_1}{Q_1} = \frac{Ndfs\ \%}{As} \qquad (13)$$

Puisque le Ndff% est déterminé expérimentalement par l'emploi de ^{15}N et la quantité d'engrais ajoutée est connue, nous pouvons déterminer la quantité de N disponible dans le sol (As) en équivalents engrais (ici du sulfate d'ammonium).

Pour la plante poussant sur du sol avec émondes, une troisième source de N (N des émondes) est disponible pour la croissance de la plante et par conséquent, d'après le concept de valeur A, nous pouvons établir les relations suivantes :

$Ndff_2\ \% + Ndfs\ \% + Ndfe\ \% = 100$

$$\text{et} \quad \frac{Ndff_2\ \%}{Q_2} = \frac{Ndfs\ \% + Ndfe\ \%}{As+e}$$

nous en déduisons donc

$$As+e = Q_2 \frac{100 - Ndff_2\ \%}{Ndff_2}\ \% \qquad (14)$$

et de la relation As+e = As + Ae , nous tirons: Ae = As+e - As .

La quantité de N provenant des émondes est calculée à partir de l'égalité suivante :

$$\frac{Ndfe\ \%}{Ae} = \frac{Ndff_2\ \%}{Q_2}$$

$$Ndfe\ \% = \frac{Ndff_2\ \% \cdot Ae}{Q_2} \qquad (15)$$

d'où nous déduisons fNdfe = QN . Ndfe % où QN est N total de la plante.

2.5. Essai préliminaire pour le choix de *Senna siamea* comme plante de référence dans l'évaluation de la fixation de N_2 de *Gliricidia sepium*

Senna siamea, qui est une Césalpiniacée non nodulante, est souvent utilisée comme plante de référence dans l'évaluation de la fixation de N_2 de *Gliricidia sepium* par les méthodes isotopiques (abondance naturelle de ^{15}N et la valeur A). Ces méthodes nécessitent que plusieurs conditions soient satisfaites. Une de ces conditions est la similitude des systèmes racinaires de la plante fixatrice de N_2 et de la plante de référence. L'objectif de cet essai préliminaire consiste à vérifier, par l'analyse de l'enracinement, la pertinence de l'utilisation de *S. siamea* comme plante de référence dans la quantification de la fixation de N_2 de *G. sepium*. Pour cela nous avons suivi et mesuré la croissance racinaire de deux espèces cultivées en rhizotrons disposés dans un dispositif en randomisation totale avec cinq répétitions. Les résultats obtenus ont montré des différences d'enracinement entre les deux espèces étudiées. La vitesse moyenne d'enracinement de *G. sepium* est supérieure à celle de *S. siamea* les trois premiers mois après semis. De plus, au cours de cette période, *G. sepium* bénéficie d'une meilleure colonisation des différents horizons que *S. siamea* en émettant plus de racines. Après cette période, les systèmes racinaires deviennent similaires. Les différences de morphologie et de croissance racinaires observées entre les deux espèces invalident le choix de *S. siamea* comme plante de référence si l'on applique les méthodes de marquage isotopique durant une période de trois mois de culture. Au delà de quatre mois, *S. siamea* peut, par conséquent, être utilisé comme de référence pour la quantification de la fixation de N_2 de *G. sepium.*

Tableau 1 : Techniques d'analyses pratiquées au laboratoire central d'analyses "sol - eau - plante" du Centre National de Recherches Agronomiques de Bambey (CNRA) de l'Institut Sénégalais de Recherches agricoles (ISRA) au Sénégal.

Paramètres mesurés	Techniques d'analyses
pH eau - KCl	Suspension 1/2.5 Electrode à pont KCl
Granulométrie complète	Méthode à la pipette Robinson pour la fraction fine et le tamisage des sables et limons grossiers Dispersion à l'hexaméta-phosphate de sodium Destruction de la matière organique par de l'eau oxygénée
Carbone total	Méthode Wakley-Black modifiée Oxydation du carbone organique du sol par le bichromate de potassium Dosage volumétrique au sel de Mohr de l'excès de bichromate
Azote total	Méthode Kjeldhal Minéralisation par l'acide sulfurique concentré en présence de catalyseur (réaction de Berthelot) Dosage colorimétrique à l'auto-analyseur au salycilate de sodium, dichloroisocyanate de sodium
Bases échangeables et capacité d'échange cationique (CEC) (Orsini et Remy, 1976)	Extraction au chlorure de cobaltihéxamine Dosage par absorption atomique (Ca, Mg, Co), CEC et émission de flamme (K, Na)
Phosphore total	Destruction du squelette siliceux par attaque fluorhydrique à chaud Résidus en milieu chlorhydrique Dosage par colorimétrie à froid du phospho-molybdate d'ammonium avec réduction par l'émétique et l'acide ascorbique
Phosphore assimilable (Dabin, 1967)	Méthode Olsen modifiée Extraction au FNH_4 - Na H CO_3 à pH 8.5 par NaOh Dosage colorimétrique à l'auto-analyseur au sulfomolybdate d'ammonium avec réduction à l'acide ascorbique à 80° C

CHAPITRE III. DIAGNOSTIC ET APPROCHE SPATIALE DE LA FIXATION DE N_2 PAR L'ARBRE A L'ECHELLE DU PAYS

CHAPITRE III.

DIAGNOSTIC ET APPROCHE SPATIALE DE LA FIXATION DE N_2 PAR L'ARBRE A L'ECHELLE DU PAYS

3.1. INTRODUCTION

L'échec de certaines pratiques agroforestières par le passé nous impose une stratégie. Pour cela, nous devons nous interroger d'abord sur la faisabilité et les modalités de mise en oeuvre de ces pratiques en fonction de la variabilité du milieu (sol, climat et pression foncière) et en fonction de la diversité des exploitations (objectifs des agriculteurs, moyens et contraintes socio-économiques). Ensuite, nous devons porter nos efforts sur la fixation de N_2 et les problèmes de compétition avec la culture associée. L'importance des arbres fixateurs de N_2 n'est plus à démontrer (Bowen et al., 1990). Paradoxalement, comme l'ont souligné de nombreux auteurs, peu d'essais ont été conduits pour étudier la fixation de N_2 dans les écosystèmes naturels (Domenach et al., 1989; Hansen et Pate, 1987; Mariotti et al., 1992; Yoneyama et al., 1990 a; 1990 b; Sanginga et al., 1990; Sanginga et al., 1991). Beaucoup d'arbres fixateurs de N_2 sont potentiellement utilisables dans des systèmes agroforostiers tels que la culture en couloirs, mais seulement quelques uns ont été évalués. Des arbres comme *Leucaena spp* et *Gliricidia spp*, qui ont fait l'objet de recherches intenses au Nigéria en zone tropicale, ont une fixation de N_2 potentielle élevée (Kang et al., 1990). Mais ces espèces ligneuses ne peuvent s'établir convenablement en zones arides et semi-arides. Une des causes du faible taux d'adoption de la technologie d'un système comme la culture en couloirs, en dehors des raisons socio-économiques, réside dans la difficulté d'établissement et de fonctionnement de la fixation de N_2 de ces espèces cultivées en haies (Okogun et al., 1994). L'évaluation du pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) des arbres fixateurs de N_2 (AFN) dans les conditions écologiques naturelles est donc une condition préalable à l'étude de techniques d'amélioration. C'est en effet, par l'amélioration du % Ndfa, lorsque celui-ci est très en dessous de la fixation potentielle de N_2 (FPN), qu'on pourra mettre en oeuvre un système agroforestier durable.

La présente étude est consacrée à l'évaluation de la fixation de N_2 en milieu réel des arbres fixateurs de N_2 (AFN).

3.2. TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

3.2.1. Détermination du pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) des arbres fixateurs de N_2 (AFN)

Trois zones écologiques sont retenues: Bambey (17° 50' N et 14° 75' O) en zone Soudanienne-nord, Nioro (16° 35' N et 13° 75' O) en zone Soudanienne-sud et Djibélor (17° 35' N et 12° 50' O) en zone sub-Guinéenne. Nous définissons ces zones par l'isohyète représentant l'espérance en pluviométrie cinq années sur dix de 1970 à 1990 à Bambey, Nioro et Djibélor. Ainsi, les isohyètes sont respectivement à Bambey, Nioro et Djibélor de 400, 600 et 1100 mm.

Les sols sont principalement des sols ferrugineux tropicaux avec une nette prédominance de la kaolinite dans la fraction argileuse (Charreau et Nicou, 1971). La teneur en argile varie de 4 à 12 % dans l'horizon 0-20 cm de Bambey à Djibélor. Ces sols présentent des qualités physiques médiocres: structure peu développée, très faible stabilité structurale, très mauvaise rétention de l'eau (faiblesse du complexe colloïdal): réserve en eau facilement utilisable (R.E.U.) de 3 à 10 % et très faible teneur en P assimilable, inférieure à 10 mg kg^{-1}.

En mai 1994 , des échantillons de feuilles des arbres fixateurs de N_2 (AFN) et des non fixateurs sont récoltés à Bambey, à Nioro et à Djibélor afin d'évaluer la fixation de N_2 par les AFN. Ces arbres ont été plantés depuis une dizaine d'années ; ils ont poussé dans les conditions naturelles de l'écosystème et n'ont bénéficié d'aucun intrant ou inoculation.

Les feuilles constituent un matériel de choix pour estimer, par la méthode d'abondance ^{15}N naturelle, la fixation de N_2 par des arbres poussant en milieu naturel. Mais dans les feuilles, l'azote remobilisé à partir des réserves des autres parties de la plante peut être substantiel sur des Acacias fertilisés (Zakra et al., 1991; 1993) et influencer ainsi l'évaluation de la fixation de N_2. Dans les feuilles, l'azote remobilisé à partir du tronc et des racines peut représenter 10 à 30 % du N total de ces feuilles (Dommergues, sous presse; Domenach et Kurdali, 1989). Sur *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn, Domenach et Kurdali (1989) ont recommandé d'échantillonner les dernières feuilles formées afin d'éliminer l'erreur induite par les réserves d'azote en provenance des racines. Des prélèvements de parties terminales de branches d'arbres dans les haies des essais agroforestiers de l'ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles) sont faits en prenant soin de récolter les feuilles apparues les dernières afin de minimiser l'influence de N remobilisé à partir des réserves des racines et du tronc. Dans l'espace considéré, 4 à 5 arbres par espèce ou provenance sont prélevés et dans chaque arbre, 4 à 10 branches sont échantillonnées; ce mode d'échantillonnage permet de disposer de 4 à 5 échantillons à raison de 500 g de matière fraîche par échantillon. Ces prélèvements sont effectués au moment de la taille ou de l'émondage des arbustes. Après séchage à l'étuve à 80 ° C, chaque

échantillon est finement broyé en totalité et une aliquote est prélevée en double (2 x 10 g). Pour l'analyse finale, les échantillons sont passés au cryobroyeur et la poudre végétale est directement injectée dans un spectromètre de masse à double introduction couplé à un CHN pour la détermination de N total et des abondances naturelles de ^{15}N au Laboratoire Central du Centre National de la Recherche Scientifique à Lyon (France).

Des échantillons de sol sont prélevés dans l'horizon 0-20 cm au niveau des sites de Bambey, de Nioro et Djibélor. Ces prélèvements sont faits dans l'espace de culture des AFN (3 répétions) et en dehors des AFN (3 répétitions).

Dans la présente étude, le % Ndfa est calculé à partir des valeurs de $\delta\ ^{15}N$ déterminées sur des feuilles d'arbres récoltées dans les trois sites.

3.2.2. Détermination de $\delta\ ^{15}Np$

Des graines de *Gliricidia sepium* (Jack.) Kunth ex Walp (provenance Bandia au Sénégal) sont scarifiées et stérilisées dans une solution de H_2SO_4 concentré pendant 15 minutes puis rincées plusieurs fois avec de l'eau distillée stérile et semées dans des gaines plastiques stériles contenant 650 g de sable stérile inerte à raison de 3 graines par gaine (4 gaines au total). Un démariage à 1 plant par gaine est effectué 15 jours après levée. Trois jours après le démariage, les plants de *Gliricidia sepium* sont inoculés avec un inoculum liquide de la souche de *Bradyrhizobium* TAL5, isolée par NifTAL (Nitrogen Fixation in Tropical Agricultural Legumes) sur *Gliricidia sepium* au Nicaragua. Elle est cultivée sur du "yeast extract mannitol broth" (Vincent, 1970) à 28 °C pendant 7 jours. Au moment du démariage, immédiatement après la culture de la souche, 1 ml d'une suspension contenant 10^9 bactéries de la dite souche est additionné dans la gaine au niveau du collet de la plante. Au cours du cycle végétatif, les plants sont arrosées avec une solution nutritive sans azote (Vincent, 1970) de façon à garder une humidité proche de la capacité au champ. Après 100 jours de culture, les feuilles des plants sont récoltées et la teneur en N et le $\delta\ ^{15}N$ analysés.

3.2.3. Analyse statistique

Les données sont analysées en utilisant le logiciel STATITCF (Beaux et al., 1988). Les moyennes et les écart-types de la moyennes sont calculés pour chaque espèce ou provenance.

L'équation du % Ndfa étant de la forme: % Ndfa = (x-y) / (x-c), l'erreur-type du % Ndfa peut être calculée par la formule ci-dessous utilisée par Shearer et Kohl (1986), Domenach et al. (1989) et Kurdali et al. (1990).

Δ % Ndfa = | (y-c)/(c-x)² | Δx +| Δy | / | (c-x) | + | (x-y)/(c-x)² | Δc

où Δ % Ndfa est l"erreur-type de % Ndfa;

x, y et c sont, respectivement, les valeurs de δ ^{15}Nref., δ ^{15}Nfix. et δ ^{15}Na.

3.3. RÉSULTATS

3.3.1. Teneur en N et δ ^{15}N des sols

Les variations de l'abondance de ^{15}N du sol sous AFN et hors AFN sont très faibles ; on prend alors la moyenne des 6 répétitions.

La teneur en N du sol est de 0,280, 0,333 et 0,720 g kg^{-1}, respectivement, à Bambey, Nioro et Djibélor. Les valeurs de δ ^{15}N sont de +6,58 à Bambey, +6,03 à Nioro et de +6,85 à Djibélor (tableau 2). Ces valeurs de δ ^{15}N des sols sont comprises dans les gammes de celles trouvées dans les sols du Brésil et des Philippines variant de +5 à +11 (Yoneyama, 1987) et de celles des sols de Thaïlande variant de +3,7 à +9,5 (Yoneyama et al., 1993) mais inférieures à celles (+7,7 à +8,2) des sols du Burundi trouvées par Snoeck (1995)

Tableau 2 : Teneur en N (g kg^{-1}) et δ ^{15}N (parties pour mille) des sols

Sols	N (g kg^{-1})	δ ^{15}N
Bambey	0,280±0,014	+6,58±0,10
Nioro	0,333±0,052	+6,03±0,24
Djibélor	0,720±0,034	+6,85±0,10

Horizon de prélèvement de sol =0-20 cm

Chaque valeur est la moyenne de 6 répétitions

Les chiffres précédés de ± indiquent l'écart-type de la moyenne (SE)

3.3.2. δ ^{15}Np de la plante fixatrice sur milieu nutritif sans azote minéral

Le δ ^{15}Np concerne N de la plante dérivé de la fixation de N_2. Pour le calcul de δ ^{15}Np, nous avons cultivé, en milieu contrôlé et *in vitro*, du *Gliricidia sepium* sur milieu nutritif sans N (sable inerte) et inoculé avec la souche de *Bradyrhizobium* TAL5 isolée sur *Gliricidia sepium* au Nicaragua. Les valeurs de δ ^{15}N trouvées dans les feuilles varient de -1,20 à -2,21 avec une moyenne de -1,70 ± 0,32.

Cette valeur moyenne de δ ^{15}Np du *Gliricidia sepium* est identique à celle trouvée sur *Prosopis glandulosa* Torr.: -1.70 (Shearer et al., 1983), proche de celle trouvée sur *Alnus spp*: -1,80 (Domenach et al., 1989), et inférieure à celle déterminée sur *Casuarina equisetifolia* (L.): -1,00 (Mariotti et al., 1992). Nous avons choisi la valeur de δ ^{15}Np de -1,70±0.32 pour l'estimation de la fixation (Ndfa) des espèces arbustives dans les trois sites : Bambey, Nioro et Djibélor .

3.3.3. δ ^{15}N des plantes de références

Les plantes de référence sont constituées de non légumineuses (*Azadirachta indica* Juss. et *Guiera senegalensis* J.F. Gmel) et de légumineuses non fixatrices de la famille des Césalpiniacées (*Senna siamea* (Lam.) H.S. Hirwin & Barneby, *Cassia sclerosperma* A. Cunn ex Vog., *Bauhinia rufescens* (Lam.) et *Piliostigma reticulatum* (DC) Hocht) qui ne nodulent pas (Allen et Allen, 1981; Sprent et Sutherland, 1990).

Les δ ^{15}N de plusieurs plantes de référence (**δ** ^{15}N ref.) sont analysés. Le **δ** ^{15}N ref. retenu est la moyenne des **δ** ^{15}N ref. des deux plantes de référence se rapprochant le plus du **δ** ^{15}N du sol (tableaux 3 a, 3 b et 3 c). Ainsi les **δ** ^{15}N ref. retenus sont de +5,49 à Bambey, +5,57 à Nioro et +6,89 à Djibélor. Le δ ^{15}N ref. est plus élevé au sud (zone plus humide) qu'au nord (zone plus sèche). En ce qui concerne *A. indica*, le **δ** ^{15}N ref. varie de + 4,9 à Bambey à + 8,22 à Djibélor, en passant par Nioro où il prend une valeur intermédiaire de + 6.16.

Tableau 3 a : Teneur en N (%) et δ ^{15}N (parties pour mille) des plantes à Bambey.

Espèces poussant à Bambey	*N (%)*	δ ^{15}N
<u>Légumineuses non nodulantes</u>		
Senna siamea	2,22 ±0,12	4,29 ± 0,11
Cassia sclerosperma var1	1,58 ±0,04	4,84 ± 0,09
Cassia sclerosperma var2	1,58 ±0,05	4,73 ± 0,10
Cassia sclerosperma var3	1,62 ±0,03	4,66 ± 0,18
Bauhinia rufescens	1,81 +0,08	6,03 ±0,42
<u>Non légumineuse</u>		
Azadirachta indica	1,82 ±0,05	4,95 ±0,25
Moyenne plantes de référence retenues*	1,81	5,49
<u>Légumineuses nodulantes</u>		
Gliricidia sepium	3,93 ±0,07	4,29 ±0,27
Hardwickia binata	1,66 ±0,03	3,90 ±0,18
Prosopis cineraria	2,09 ±0,05	3,97±0,14*

* Moyenne de δ ^{15}N ref. de *B. rufescens* et de *A. indica*
Chaque valeur est la moyenne de 4 répétitions
Les chiffres précédés du signe ± indiquent les valeurs de l'écart-type de la moyenne (SE)

Tableau 3 b : Teneur en N (%) et $\delta\ ^{15}N$ (parties pour mille) des plantes à Nioro.

Espèces poussant à Nioro	N (%)	$\delta\ ^{15}N$
Légumineuses non nodulantes		
Piliostigma reticulatum	1,49±0,06	4,73±0,16
Senna siamea	2,60±0,09	4,58±0,04
Non légumineuses		
Azadirachta indica	2,99±0,11	6,16±0,59
Guiera senegalensis	1,29±0,04	4,99±0,49
Moyenne plantes de référence retenues*	2,34	5,57
Légumineuses nodulantes		
Prosopis cineraria	2,10±0,06	4,01±0,10
Hardwickia binata	1,52 ±0,03	5,66±0,04
Leucaena leucocephala	3,82 ±0,10	5,69±0,12
Acacia holosericea	1,46 ±0,05	2,74±0,09
Gliricidia sepium ILG50	3,96 ±0,06	5,11±0,09
Gliricidia sepium ILG55	3,65 ±0,12	5,39±0,04
Gliricidia sepium HYB	3,68 ±0,13	5,48±0,16

* Moyenne de $\delta\ ^{15}N$ ref. de *G. senegalensis* et de *A. indica*
Chaque valeur est la moyenne de 4 répétitions
Les chiffres précédés du signe ± indiquent les valeurs de l'écart-type de la moyenne (SE)

Tableau 3 c : Teneur en N (%) et δ ^{15}N (parties pour mille) des plantes à Djibélor

Espèces poussant à Djibélor	N (%)	δ ^{15}N
Senna siamea	3,22±0,12	+5,57 ± 0,10
Azadirachta indica	2,45±0,09	+8,22 ±0,43
Moyenne plantes de référence retenues*	2,83	+6,89
G. sepium IL 50	4,90±0,15	-0,55±0,11
G. sepium IL 52	5,06±0,19	-0,08±0,23
G. sepium IL 54	4,69±0,13	+0,27±0,29
G. sepium IL 55	5,45±0,20	-0,55±0,11
G. sepium IL 56	4,99±0,22	-0,75±0,22
G. sepium IL 57	4,68±0,11	-0,54±0,09
G. sepium IL 58	4,61±0,12	+0,34±0,01
G. sepium IL 59	4,84±0,28	-0,34±0,12
G. sepium IL 60	4,94±0,09	-0,41±0,26
G. sepium IL 61	4,84±0,13	-1,30±0,12
G. sepium IL 62	4,34±0,08	+0,27±0,14
G. sepium IL 63	4,40±0,09	-0,07±0,07
G. sepium HYB	4,44±0,12	+0,00±0,09

* Moyenne de δ ^{15}N ref. de *S. siamea* et de *A. indica*
Chaque valeur est la moyenne de 4 répétitions
Les chiffres précédés du signe ± indiquent les valeurs de l'écart-type de la moyenne (SE)

3.3.4. Estimation du pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa)

Les valeurs de %Ndfa pour les différentes espèces poussant dans les trois sites sont présentées dans les tableaux 4 a, 4 b et 4 c.

3.3.4.1. Pourcentage de N_2 fixé à Bambey.

Parmi les AFN analysés à Bambey, G. *sepium* possède la valeur de $\delta\ ^{15}N$ la plus rapprochée (+4,29) de celle du $\delta\ ^{15}N$ ref. (+5,49) indiquant une faible fixation de N_2 (% Ndfa = 17 %). Par contre, *Hardwickia binata* et *Prosopis cineraria* ont des $\delta\ ^{15}N$ plus faibles (+3,90 et +3,97, respectivement), suggérant ainsi des contributions respectives de la fixation de N_2 (%Ndfa) de 22 % et de 21 % (tableau 4a). Au regard de l'erreur expérimentale commise sur l'estimation du §Ndfa ces légumineuses présentent des niveaux de fixation de N_2 très faibles et ne différent pas entre elles. On observe que *Gliricidia sepium* montre la teneur en N la plus élevée parmi les trois espèces alors que son % Ndfa est le plus faible.

Tableau 4 a: Pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) à Bambey.

Espèces	% Ndfa (Δ % Ndfa)
Gliricidia sepium	17 (11)
Prosopis cineraria	21 (9)
Hardwickia binata	22 (9)

% Ndfa estimé pour $\delta\ ^{15}N$ ref. = +5.49
Chaque valeur est la moyenne de 4 répétitions
Entre parenthèses sont indiquées les valeurs de l'erreur-type de la moyenne

3.3.4.2. Pourcentage de N_2 fixé à Nioro

A l'exception de *Acacia holosericea* Cunn ex G. Don., toutes les valeurs de $\delta\ ^{15}N$ des espèces légumineuses connues comme nodulantes: *Prosopis cineraria*, *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit et *Hardwickia binata* sont similaires au $\delta\ ^{15}N$ ref., à l'erreur expérimentale près (tableau 4 b). Seule la première espèce révèle un % Ndfa (39 %) nettement

supérieur.

Comme à Bambey, la teneur en N la plus élevée (3.96 %) est observée chez *G. sepium* ILG50 qui ne fixe que 6 % de son N total.

Tableau 4 b : Pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) à Nioro

Espèces	% Ndfa (Δ % Ndfa)
Acacia holosericea	39 (11)
Prosopis cineraria	21 (12)
Gliricidia sepium ILG50	6 (13)
Gliricidia sepium ILG55	2 (12)
Gliricidia sepium HYB	1 (15)
Hardwickia binata	0 (13)
Leucaena leucocephala	0 (15)

% Ndfa estimé pour δ ^{15}N ref. = +5.57
Chaque valeur est la moyenne de 4 répétitions
Entre parenthèses sont indiquées les valeurs de l'erreur-type de la moyenne

3.3.4.3. Pourcentage de N_2 fixé à Djibélor

Plusieurs provenances de *G. sepium* sont criblées. Les valeurs de δ ^{15}N trouvées sont nettement inférieures à la valeur moyenne de δ ^{15}N ref. (+6,89) (tableau 3 c). Les valeurs de δ ^{15}N varient de −1,30 pour la provenance ILG61 à +0,34 pour la provenance ILG58. Contrairement à Bambey et à Nioro, la contribution de la fixation de N_2 (% Ndfa) à l'alimentation azotée des plantes est très importante à Djibélor, variant de 76 % pour ILG58 à 95 % pour ILG61 (tableau 4 c).

Tableau 4 c : Pourcentage de N_2 fixé (% Ndfa) à Djibélor

Espèces	% Ndfa (Δ % Ndfa)
G. sepium IL 50	87 (9)
G. sepium IL 52	81 (12)
G. sepium IL 54	77 (15)
G. sepium IL 55	87 (9)
G. sepium IL 56	89 (11)
G. sepium IL 57	86 (8)
G. sepium IL 58	76 (8)
G.sepium IL 59	84 (9)
G. sepium IL 60	85 (12)
G. sepium IL 61	95 (7)
G. sepium IL 62	77 (11)
G. sepium IL 63	81 (9)
G. sepium IHYB	80 (9)

% Ndfa estimé pour $\delta\ ^{15}N$ ref. = +6.89
Chaque valeur est la moyenne de 4 répétitions
Entre parenthèses sont indiquées les valeurs de l'erreur-type de la moyenne

3.3.5. Essai d'amélioration de la fixation de N_2 de *Gliricidia sepium* à Nioro

Les faibles niveaux de % Ndfa trouvés à Nioro nous ont amené à rechercher comment améliorer le pourcentage de N_2 fixé. On pourrait penser que les principaux facteurs limitants de la fixation de N_2 dans cette zone sont l'eau et les éléments minéraux tel que P. C'est la raison pour laquelle, nous avons cultivé *G. sepium* dans des gaines plastiques en conditions de culture en serre en lui assurant une nutrition hydrique et minérale optimale (sans N) et inoculé avec la souche de *Bradyrhizobium* TAL5

selon la technique d'inoculation et les conditions de culture des plantes décrites précédemment. Les traitements : T1 (*G. sepium* poussant sur le sol de Nioro où ont poussé les arbres testés) et T2 (*G. sepium* inoculé avec la souche de *Bradyrhizobium* TAL5 et poussant sur du sol de Nioro) sont comparés dans un dispositif en randomisation totale avec 4 répétitions. Les résultats obtenus après 3 mois de culture sont indiqués dans le tableau 5. L'examen des résultats du tableau 5 confirme les valeurs élevées de $\delta\ ^{15}N$ de *G. sepium* obtenues *in situ* (voir plus haut). On peut en déduire que le facteur limitant de la fixation de N_2 à Nioro ne serait ni l'eau ni les éléments minéraux autres que N puisque ceux-ci ont été apportés à l'optimum dans l'expérience en objet. Il est probable que le facteur limitant majeur soit une déficience de la symbiose due à une absence de la souche spécifique native ou à des contraintes autres que le manque d'eau ou d'éléments minéraux. L'inoculation par une souche efficiente telle que TAL5 induit la nodulation et la fixation de N_2, ; c'est une technique possible d'amélioration du pourcentage de N_2 de *Gliricidia sepium* à Nioro qu'il conviendrait de tester en milieu réel.

Tableau 5 : Effet de l'inoculation de la souche de *Bradyrhizobium* TAL5 sur la production de parties aériennes, la formation de nodosités et du $\delta\ ^{15}N$ de *Gliricidia sepium*

Traitements	Poids sec (g plante $^{-1}$)		$\delta\ ^{15}N$	
	Tiges + feuilles	Nodosités	Tiges +feuilles	Nodosités
T1: *G. sepium* + sol de Nioro	0,53 ± 0,08	néant	9,09 ± 2,59	néant
T2: *G. sepium* + sol de Nioro +inoculum TAL5	4,87 ± 0,96	0,61 ± 0,24	-1,99 ± 0,08	12.69

Chaque valeur est la moyenne de 4 répétitions

Les chiffres précédés du signe ± indiquent les valeurs de l'écart-type de la moyenne(SE)

3.4. DISCUSSION - CONCLUSION

La validité de l'estimation de la fixation de N_2 par la technique ^{15}N repose sur le choix de la plante de référence généralement considéré comme étant la principale source d'erreur lorsque l'engrais est la source d'azote marquée (Fried et al., 1983). Son choix est particulièrement difficile pour des AFN pour lesquels des lignées non nodulantes ne sont pas encore disponibles. *Senna siamea* et *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ont déjà été utilisées comme plantes de référence pour estimer la fixation de N_2 chez *Leucaena leucocephala* (Lam.) et *Acacia albida* (L.) = *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (Sanginga et al., 1990). Une autre difficulté de la méthode $\delta\ ^{15}N$ réside dans la nécessité que ces plantes de référence soient très proches des AFN et exploitent le même pool d'azote du sol. Pour réduire les possibles erreurs dans le choix de la plante de référence, Domenach et al. (1989) conseillent de prendre une valeur moyenne de $\delta\ ^{15}N$ de plusieurs plantes de référence (plutôt qu'une seule) poussant dans le même environnement que les AFN. C'est à ce titre que nous avons mis l'accent sur la recherche d'un $\delta\ ^{15}N$ ref. moyen pertinent au niveau de chaque site. Nos résultats montrent que les valeurs du $\delta\ ^{15}N$ du sol sont suffisamment élevées (> 4 parties pour mille) et assez homogènes au sein d'un site pour que la méthode $\delta\ ^{15}N$ puisse être utilisée (Peoples et al., 1988) . Sauf à Bambey où le $\delta\ ^{15}N$ ref. est inférieur à celui du sol, particulièrement pour le *S. siamea*, les valeurs de $\delta\ ^{15}N$ ref. trouvées dans les sites de Nioro et de Djibélor sont très proches ou identiques de celles des $\delta\ ^{15}N$ des sols.

Ces $\delta\ ^{15}N$ ref. augmentent selon un gradient écologique nord-sud: Bambey :+5.49, Nioro : +5.57, Djibélor : +6.89. Le pourcentage de N_2 fixé est très faible à Bambey (% Ndfa ≤ 22%) et à Nioro (% Ndfa ≤ 39) et très forte à Djibélor (variant entre 76 ≤ % Ndfa ≤ 95 %). Dans un même, les différences de niveaux de Ndfa % observées entre espèces pourraient s'expliquer par leur spécificité vis-à-vis des populations natives de *Bradyrhizobium*: *G. Sepium* est une espèce spécifique contrairement à *A. holosericea.*

Pour expliquer cela, nous fondant sur les résultats d'une expérience en milieu contrôlé, effectuée sur le sol de Nioro, nous avançons l'hypothèse d'une déficience de la fixation de N_2, liée à la souche de *Bradyrhizobium* qui vraisemblablement est absente ou ne s'exprime pas dans l'environnement de Nioro. En revanche, dans la zone de Djibélor, les souches de *Bradyrhizobium* spécifiques sont présentes et s'expriment efficacement dans cette zone. Nous mettons donc en évidence deux zones (soudano-sahélienne et sub-guinéenne) fortement contrastées en ce qui concerne le pourcentage de N_2 fixé. Parmi les contraintes qui prévalent dans la première, la zone soudano-sahélienne, les principales sont (i) des faibles teneurs d'argile (≤ 7 %) (ii) des faibles précipitations (≤ 600 mm de pluies par an) sur une durée n'excédant pas quatre mois et (iii) secondairement des fortes teneurs en N minéral de la solution du sol résultant des cycles marqués de dessèchement et de réhumectation

(Blondel, 1971; Sprent, 1976). Ces conditions environnementales sont défavorables à l'installation ou à l'expression de *Bradyrhizobium* natifs parce que la nodulation dans le sol est insuffisante et insuffisamment répétée dans le temps pour développer et entretenir cette population de souches natives. Mais ces souches peuvent être présentes en profondeur et y former des nodosités efficientes (Felker, 1986; Virgina et al., 1986). En revanche, sous climat plus humide comme à Djibélor (≥ 1000 mm de pluies par an), en raison de conditions environnementales favorables, on observe une nodulation abondante (Dupuy et Dreyfus, 1992) permettant ainsi l'installation progressive des souches de *Bradyrhizobium* efficaces, au fur et à mesure des nodulation répétées. Ducousso et al. (1996) abondent dans le sens de notre explication: d'une part ils signalent pour une autre espèce (*Acacia albida*) que la plupart des souches de *Bradyrhizobium* isolées dans la zone sahélienne sont inefficaces ; d'autre part ils montrent que la prolifération des populations de *Rhizobium* est très liée à la présence durable de l'arbre-hôte.

Les faibles valeurs de % Ndfa trouvées dans les zones de Bambey et de Nioro montrent que les AFN évalués dans ces zones dépendent beaucoup plus de N du sol (sol comprenant la nappe phréatique) que de la fixation de N_2, en raison de contraintes majeures affectant la fixation de N_2.

Le pourcentage de N_2 fixé semblerait donc obéir à un effet de seuil pluviométrique ; ce seuil serait compris entre 700 et 1000 mm. En plus ce pourcentage de N_2 fixé par l'arbre dépendrait des populations rhizobiennes compatibles.

Les valeurs de $\delta\ ^{15}N$ observées chez *Senna siamea* +4.29 à Bambey et +4.58 à Nioro et +5.57 à Djibélor, sont assez proches de celles des $\delta\ ^{15}N$ des AFN réputés fixateurs de N_2 (Allen et Allen, 1981). Toutefois, nous ne pouvons pas conclure à une fixation de N_2; en effet, des facteurs morphologiques (immobilisation des rhizobiums à la base des poils absorbants, tissu cortical très réduit) et biochimiques (production de composés antibactériens, de composés phénoliques, de tanins et de quinones dans les cellules des racines) militent contre la formation de nodosités sur les racines de *Senna siamea* (Allen et Allen, 1981) .

Pour l'instant, aucune hypothèse valable ne peut être avancée pour expliquer les faibles valeurs de $\delta\ ^{15}N$ chez *S. siamea*. Cela ouvre une piste de recherche intéressante pour déterminer les causes et le déterminisme de ce phénomène.

CHAPITRE IV: ETUDE *IN VITRO* DE LA CINÉTIQUE DE BIODÉGRADATION D'EMONDES DE *GLIRICIDIA SEPIUM* ET DE *SENNA SIAMEA* DANS UN SOL SABLEUX DU SÉNÉGAL

CHAPITRE IV

CINÉTIQUE DE BIODÉGRADATION *IN VITRO* D'EMONDES DE *GLIRICIDIA SEPIUM* ET DE *SENNA SIAMEA* DANS UN SOL SABLEUX DU SÉNÉGAL

4.1. INTRODUCTION

La très faible utilisation de l'engrais azoté en culture céréalière en Afrique de l'Ouest conduit les agriculteurs à rechercher d'autres sources d'azote. Le fumier en est une, les émondes de légumineuses arborées en sont une autre. Cette dernière pratique, qualifiée d"agrobiologique" est une voie d'avenir pour assurer la durabilité des systèmes de production.

C'est dans cette optique que des nombreux essais de culture en couloirs sont actuellement conduits en Afrique de l'Ouest et notamment au Sénégal (ISRA, 1992). Toutefois, dans ces essais seuls les effets sur le rendement des cultures et l'adaptation des espèces arbustives sont étudiés. Parmi les espèces étudiées, *Gliricidia sepium* (Papilionacée nodulante) et *Senna siamea* (Césalpiniacée, non nodulante) sont adaptées et présentent un potentiel de production d'émondes important dans cette zone.

Les mécanismes par lesquels l'arbre, via les émondes, influence le rendement de la culture requiert une meilleure connaissance de certains paramètres. Parmi ces paramètres, la vitesse et l'intensité de la biodégradation des émondes, surtout en conditions climatiques marquées par des périodes de sécheresse de durée très variable, sont à connaître pour gérer la nutrition minérale des cultures vivrières. La recherche de la synchronisation entre l'offre et la demande en azote est fondée sur la connaissance de ces paramètres et leur détermination en fonction des conditions écologiques.

En effet, les émondes interagissent avec la micro et meso faune: en particulier avec les termites qui jouent un rôle important dans la décomposition des litières en zone de savane d'Afrique (Lavelle et al., 1990). La vitesse de biodégradation d'émondes d'arbustes dépend de leur teneur initiale en N (Myers et al., 1994) et peut être très élevée sous climat tropical (Palm et Sanchez, 1990). De nombreux travaux notamment ceux de Haynes 1986), Oglesby et Fownes (1992), Mtambaningwe et Kirchmann (1995) et Ugen (1996) ont montré une bonne corrélation entre la teneur en N de la litière et l'azote minéralisé à partir de cette litière dans le sol. En outre, les mécanismes ou modes d'action par lesquels les polyphénols contenus dans la litière inhibent la minéralisation d'azote sont assez bien connus, ceux-ci ont été récemment revus par Ugen (1996) : (i) formation par liaison aux protéines de polymères résistants à la décomposition, (ii) fixation des nitrites ou nitrosation et (iii) effet bactéricide

et fixation sur les structures membranaires des microorganismes. La lignine, se dégradant en composés phénoliques, a les mêmes effets sur la minéralisation (Fox et al.,1990). Corrélativement à la biodégradation de la matière végétale, il se produit une libération de N qui peut atteindre, pour une litière de *Leucaena leucocephala*, 200 kg N ha^{-1} an^{-1} soit 80% de N total enfoui (Sandhu et al., 1990). La biodégradation des émondes et la libération de N qui en découle sont soumises à l'influence des facteurs climatiques. En particulier, une situation où températures moyennes élevées et humidité continue sont concomitantes conduit à une décomposition rapide des émondes (Jordan, 1985). Par contre, des conditions où des périodes de sécheresse sont observées, cas fréquent dans la bassin arachidier du Sénégal, freinent la décomposition du matériel végétal incorporé au sol (Shields et Paul, 1973).

Notre étude consiste à mesurer les paramètres de vitesse de biodégradation et d'offre potentielle en N des émondes de *Gliricidia sepium* et de *Senna siamea* incorporées dans un sol sableux dans les conditions écologiques du centre Sénégal. Ces paramètres mesurés au laboratoire sont ensuite étudiés dans d'autres expériences que nous avons conduites *in situ*. L'objectif visé dans ce travail est de déboucher sur des indicateurs fiables, faciles à mettre en oeuvre en laboratoire avec des delais d'obtention de résultats rapides et peu coûteux, qui permettent de préciser la capacité d'offre en N et la cinétique de cette offre à l'instar d'un engrais retard.

4.2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

4.2.1. Matériel végétal

Les émondes (en réalité feuilles réduites en morceaux dont la "taille" est définie par les particules retenues par un tamis à maille de 1 mm. et passant à travers celui de maille 2 mm) sont incorporées au sol à raison de 50 mg de matière sèche pour 50 g de sol.

4.2.2. Sol utilisé

Le sol utilisé pour l'incubation provient de Nioro du Rip (région du Sine Saloum dans le bassin arachidier du Sénégal). Il est très sableux (taux d'argiles + limons = 7,5%), sa teneur en matière organique est faible (C = 0,29% ; N = 0,032% ; C/N = 9). Il est pauvre en P assimilable (P Olsen modifié Dabin = 7 mg kg^{-1}) et en K (0,07 cmol eq. kg^{-1}). Le "pH eau" (6,20) est proche de la neutralité et la capacité d'échange (1,35 cmol eq.kg^{-1}) au pH du sol est presque entièrement saturée par Ca^{++} et Mg^{++}, respectivement 0,86 et 0,40 cmol eq kg^{-1}.

4.2.3. Méthode

Nous avons utilisé une méthode inspirée de Niamai (1991). La terre est placée dans des pots en plastique (annexe 4), les émondes sont incorporées "à sec" et mélangées de manière homogène à la terre, puis cette dernière est tassée dans le pot à l'aide d'un outil de taille appropriée pour imposer à l'ensemble une densité apparente "globale" de 1,5 proche de celle observée aux champs. La teneur en eau des pots est maintenue par pesée et par réajustement régulier des poids avec de l'eau distillée . L'aération est assurée au moins deux fois par semaine. Les pots sont fermés par un couvercle afin d'éviter l'évaporation et sont placés dans une étuve maintenue à 30° C. Trois types d'incorporation sont testés :

- sol sans incorporation d'émondes,
- sol avec incorporation de 0,1% en poids d'émondes de *Gliricidia sepium*,
- sol avec incorporation de 0,1% en poids d'émondes de *Senna siamea*.

Chacun d'eux est combiné avec deux regimbes hydriques :

- potentiel hydrique maintenu en permanence à la valeur optimale correspondant au pF 2,5 (humidité pondérale (Hp) = 6,5%),
- potentiel hydrique limité en permanence à des conditions de stress hydrique soit à une valeur voisine de pF 3,5 (Hp = 3,8%).

Les traitements sont répétés trois fois et 126 pots sont mis en incubation afin d'effectuer un suivi régulier des teneurs en azote minéral ($N\text{-}NH4^+$ et $N\text{-}NO3^-$) du mélange "sol-émondes" par extraction à l'aide de KCl 1N en sortant une série toutes les semaines ou toutes les 2 semaines selon le rythme de minéralisation observé.

Parallèlement à ce suivi de N minéral, les pots destinés à être extraits en fin d'expérience sont utilisés pour assurer un suivi du CO_2 dégagé pendant la durée de l'expérience en y plaçant un godet contenant 2,5 ml de NaOH 0,5N (annexe) dont la carbonatation après 24 h de piégeage est mesurée par dosage à l'aide de HCl "étalon" 0,05N en présence de phénolphtaléïne. L'indicateur de biodégradabilité des émondes incorporées est le dégagement net de CO_2 pour les divers traitements.

4.3. RÉSULTATS

4.3.1. L'analyse des émondes

Le mode de préparation (émiettage manuel des émondes passées à l'étuve à 60°C pendant 48 heures et sélection par tamisage de la taille des particules) permet d'obtenir des produits de composition globale assez homogène (tableau 6)

Tableau 6 : Teneurs en C et N des "émondes" de *Gliricidia sepium* et *Senna siamea.*

	Valeurs caractéristiques (%) *					
Emondes	Eléments	Min	Moyenne	Max.	Erreur type (SE)	Rapport C/N
Gliricidia sepium	C	45,95	47,61	48,32	0,295	18
	N	2,807	2,650	2,970	0,039	
Senna siamea	C	45,75	46,231	46,78	0,127	12
	N	3,70	3,886	3,99	0,037	

* : valeurs moyennes et erreur type obtenues à partir de l'analyse de 8 échantillons des émondes utilisées

4.3.2. La minéralisation de N dans les sols

Dans tous les cas (témoin, incorporation d'émondes de *Gliricidia* ou de *Senna*), la minéralisation de N est d'abord orientée vers la production de $N\text{-}NH4^+$ (fig. 8) pendant environ trois semaines puis la nitrification l'emporte nettement, et de façon plus marquée lorsque le sol est placé dans des conditions d'humidité optimale d'incubation (pF 2,5). Pendant le dernier mois d'incubation, la nitrification paraît plus lente en présence d'émondes de *Senna*, surtout en conditions de stress hydrique. Toutefois, après 2 mois d'incubation, la quasi totalité de N minéralisé est, dans tous les cas, retrouvée sous forme nitrique.

Les quantités de N minéralisé au cours de l'expérience dans le sol sans incorporation d'émondes sont représentées à la figure 9. L'azote ammoniacal est présent dés la mise en incubation ($N\text{-}NH4^+$ adsorbé ou $N\text{-}NH4^+$ provenant de l'hydrolyse de matières organiques solubles en cours d'extraction par la solution saline). La nitrification est relativement lente à s'installer et ce, d'autant plus que les conditions d'humidité s'éloignent de l'optimum. La minéralisation nette de N est plus faible lorsque les conditions de stress hydrique sont maintenues pendant toute l'expérience.

La minéralisation de N des émondes (donnée par l'équation 4 et exprimée en pourcentage de N total des émondes) est calculée à chaque date de mesure (fig. 10). Les graphes de la figure 10 montrent un comportement très différent entre l'incorporation d'émondes de *Gliricidia* et de *Senna*. Dans le premier cas on observe, avec une intensité différente selon les conditions d'humidité, une libération nette de N minéral dans le milieu avec même, dans le cas d'une humidité toujours maintenue à pF 2,5, une surminéralisation de N du sol. Dans le second cas on note, au moins les trois premières semaines d'incubation, une immobilisation nette de N puis une minéralisation apparente de l'incorporation quasi nulle. La dernière date d'échantillonnage se distingue, aussi bien dans le cas du *Gliricidia* que dans celui du *Senna*, lorsque l'humidité est toujours restée optimale, par une minéralisation apparente positive de l'incorporation des émondes.

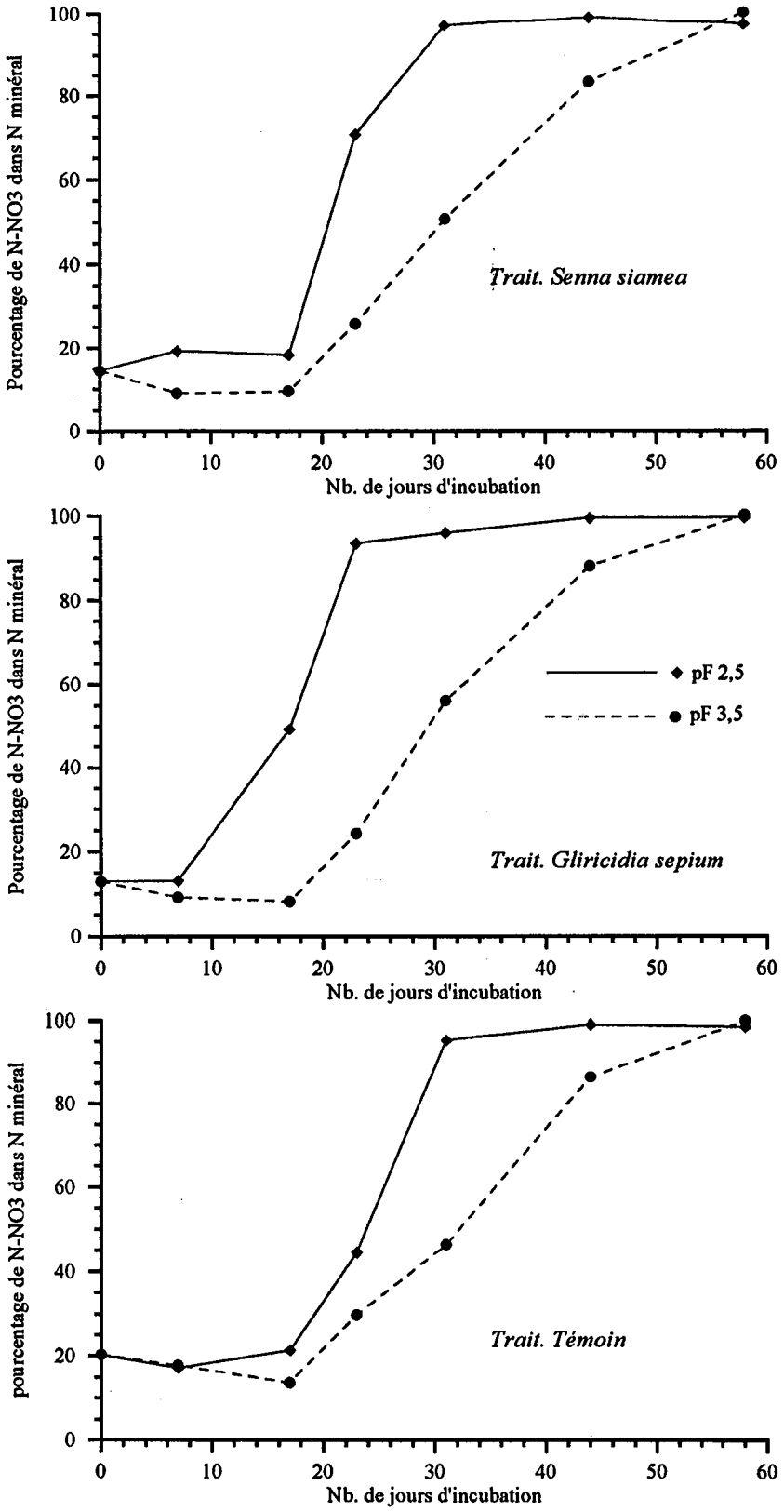


Figure 8 : Pourcentage de NO_3 dans N mineral selon le traitement

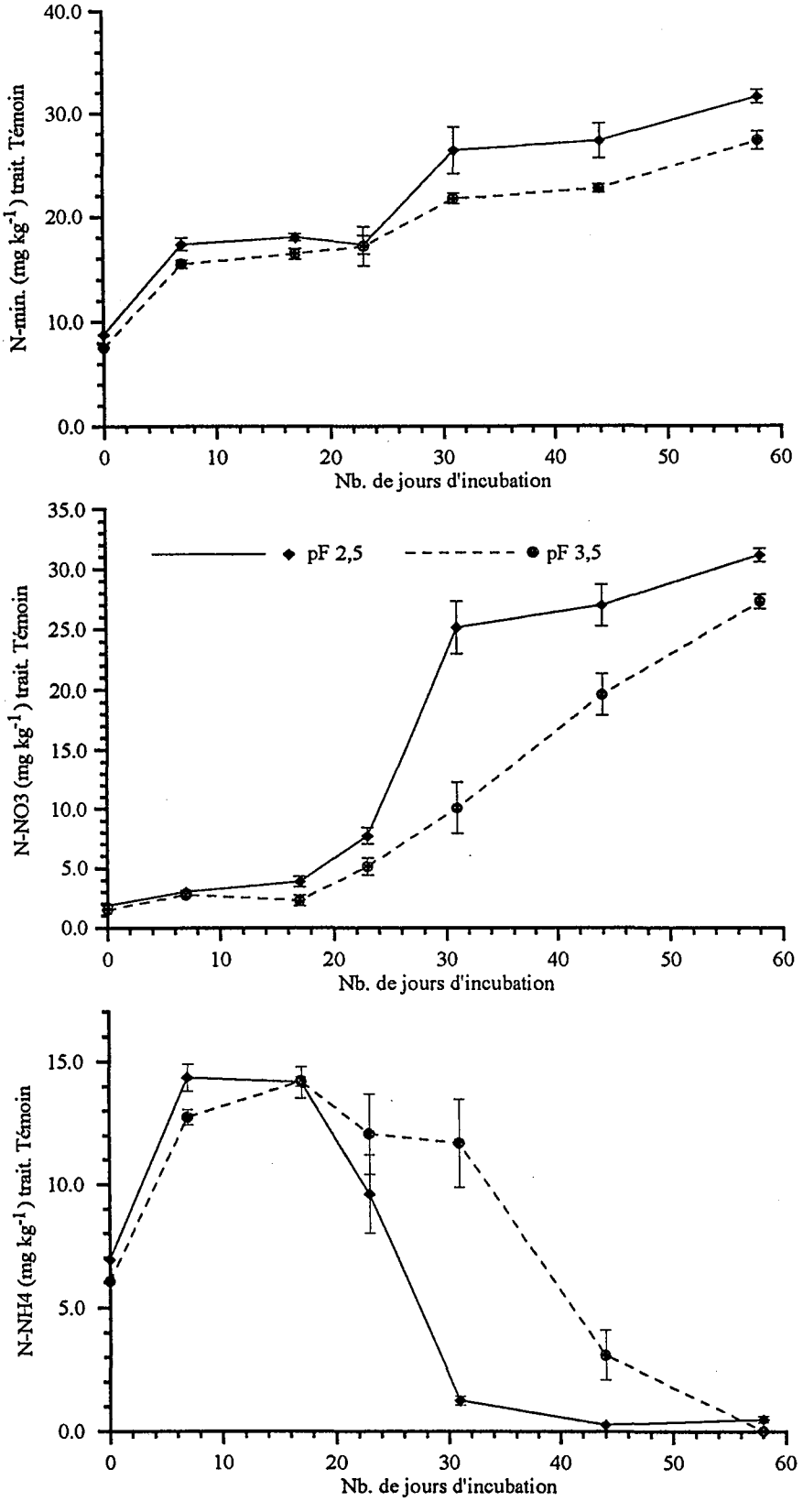


Figure 9 : Dynamique de minéralisation de N (NO_3, NH_4 et NO_3 +NH_4) pour le traitement témoin (sans émondes)

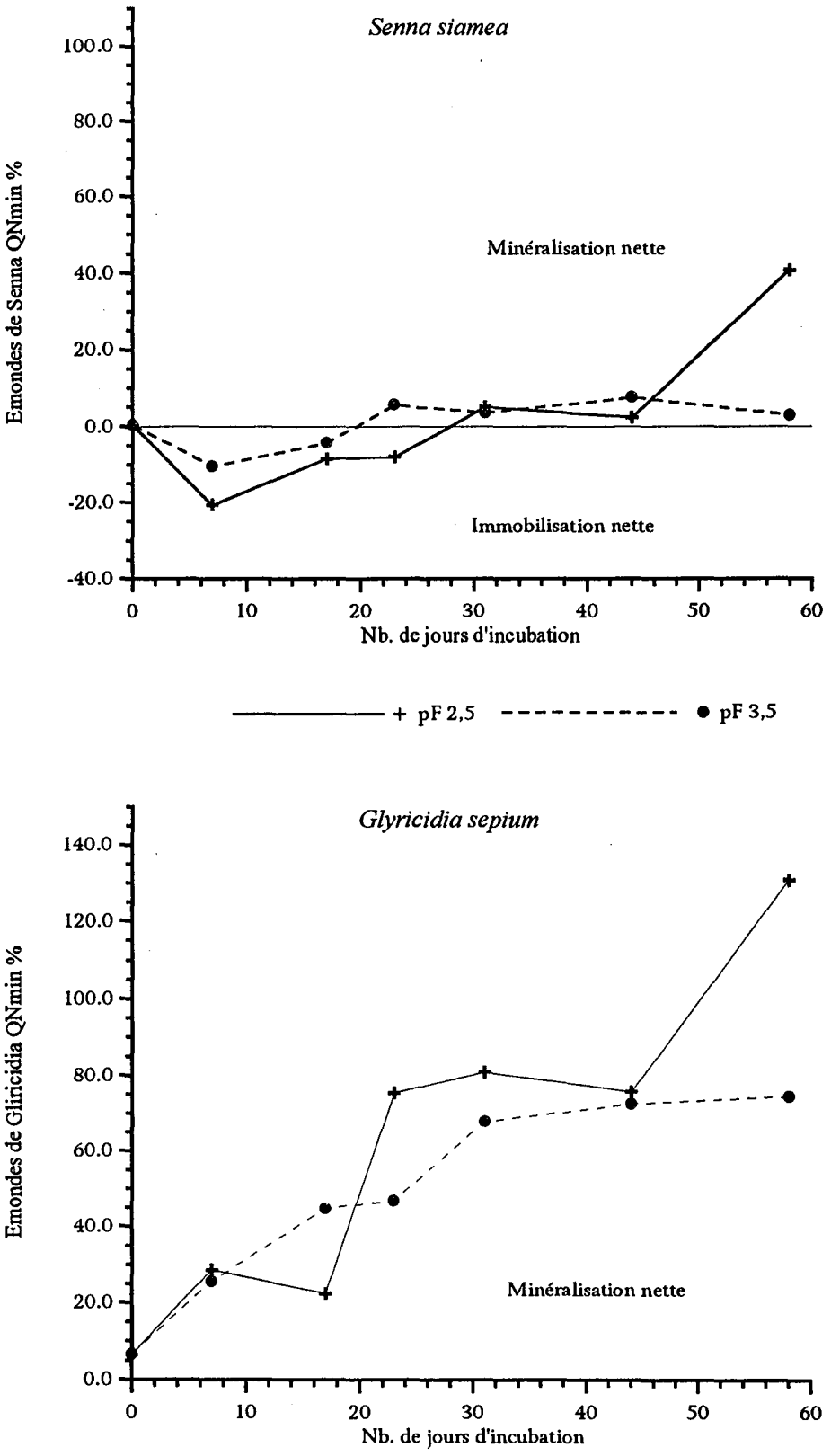


Figure 10 : Minéralisation *in vitro* de N des émondes de *Gliricidia sepium* et de *Senna siamea*

Cette analyse graphique des résultats est complétée par une interprétation statistique selon un dispositif factoriel en randomisation totale des teneurs en N minéral pour chaque date de mesure (tableau 7).

Tableau 7 : Résultats synthétiques de l'analyse statistique des teneurs en N minéral.

EFFETS/Nb. Jours	**7**	**14**	**23**	**31**	**44**	**58**
EMONDES Test de Newman et Keuls p=0,05	THS Gli > Te > Sa*	THS Gli > Te > Sa	THS Gli > Te = Sa	THS Gli > Te = Sa	THS Te = Gli > Sa	THS Gli > Sa > Te
HUMID Test de Newman et Keuls p=0,05	NS	NS	NS	THS H1 > H2	THS H1 > H2	THS H1 > H2
Interaction "EM*HUMID"	S	THS	THS	NS	NS	NS
CV%	8,31	6,32	9,21	5,95	5,21	6,94

THS ; HS et S : effet significatif respectivement à P = 0,001 ; P = 0,01 et P = 0,05
NS : effet non significatif ;
* Classement par le test de Newman Keuls à P = 0,05
Gli = Gliricidia ; Sa = Senna ; Te = Témoin sans incorporation d'émondes.
H1 = potentiel hydrique à pF 2,5 ; H2 = potentiel hydrique à pF 3,5

L'effet des deux types d'émondes utilisés est toujours significatif avec des teneurs en N minéral toujours plus élevées ou au moins équivalentes au traitement sans incorporation d'émondes. Celui du mode de gestion de l'humidité ne devient significatif qu'après 1 mois d'incubation et met alors en évidence les plus fortes teneurs observées lorsque l'humidité est optimale (pF 2,5). C'est ainsi que l'on note après 31 jours d'incubation une teneur en N minéral moyenne de 34,6 mg kg^{-1} pour le traitement conduit à pF2,5 contre 28,5 mg kg^{-1} pour celui à pF 3,5 soit un écart de +21%. Cet écart passe à +28% en fin d'incubation (58 jours).

L'impact de l'humidité diffère selon les traitements pendant le premier mois suivant la mise en incubation (interaction significative). Cela correspond à la période où N ammoniacal représente une part importante de N minéral, toutefois, le classement des diverses moyennes par le test de Newman-Keuls à P = 0,05 (plus discriminant que l'analyse globale de la variance) montre (tableau 8) que les cas où de telles effets sont réels sont rares et correspondent à l'utilisation du *Gliricidia* comme émondes.

4.3.3. La Biodégradabilité des émondes.

La biodégradabilité des émondes est appréciée par la mesure du CO_2 dégagé lors de l'incubation. Ces mesures sont effectuées régulièrement par piégeage pendant 24 heures, d'abord quotidiennement puis hebdomadairement. Les quantités mesurées sont donc des quantités "instantanées" correspondant à des vitesses pour 24 heures. Les vitesses de biodégradation au cours de l'incubation sont présentées à la figure 11. La variabilité des résultats est appréciée par l'écart type des 3 répétitions d'un même traitement. On observe une augmentation du dégagement quotidien de CO_2 dans les traitements avec incorporation des émondes, par rapport au témoin sans incorporation.

L'évolution du pourcentage apparent de minéralisation du carbone apporté par les émondes incorporées au sol est illustrée par la figure 12.

Cette figure montre une biodégradabilité plus importante dans le cas du *Gliricidia* et un effet plus marqué des conditions hydriques sur carbone dégagé qui est favorisé par les conditions optimales d'humidité (pF 2,5). Ces observations sont confirmées au point de vue statistique par l'analyse des quantités cumulées de carbone dégagé à 7 jours (infléchissement de la courbe cumulée) et en fin d'expérience.

Dés 7 jours d'incubation mais aussi en fin d'expérience, les quantités de carbone dégagé sont significativement différentes selon les traitements comme le montrent les résultats des comparaisons de moyennes selon le test de Newman-Keuls présentés au tableau 8.

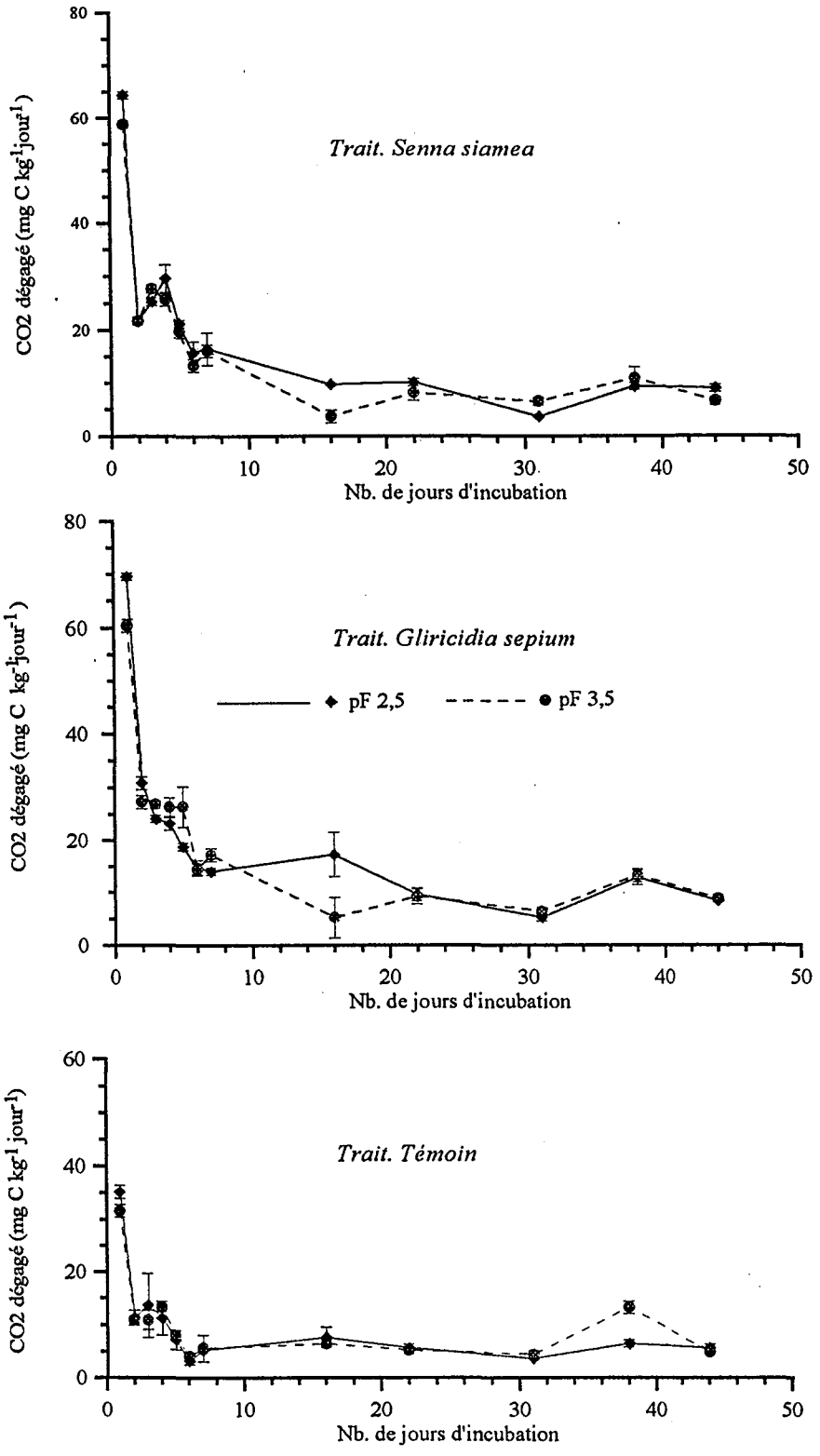


Figure 11 : Evolution *in vitro* des quantités de CO_2 dégagées au cours de l'incubation

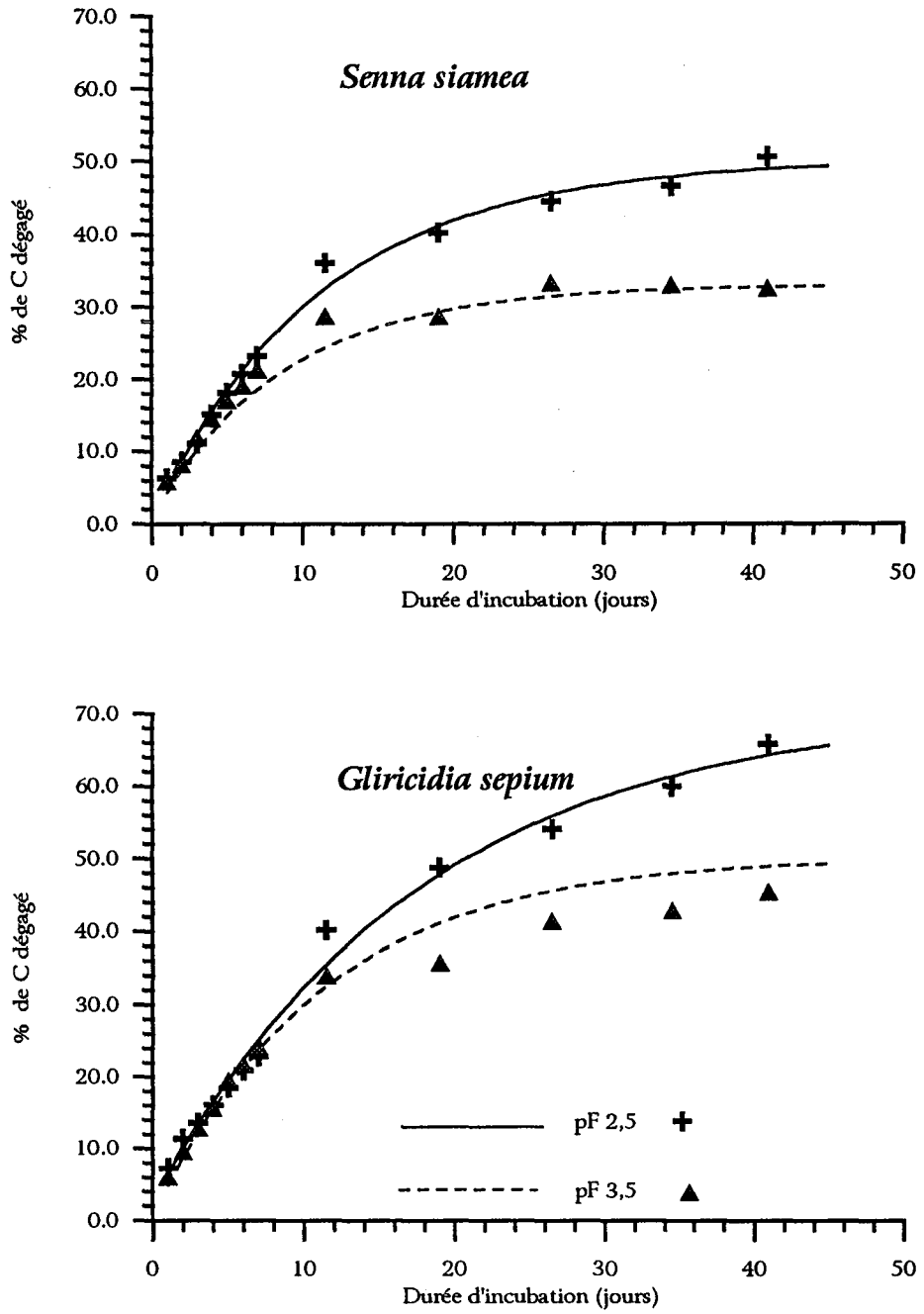


Figure : 12. Cinétique de biodégradation *in vitro* des émondes de *Gliricidia sepium* et de *Senna siamea* (% C dégagé sous forme de CO2 par rapport au C total des émondes

En fin d'expérience, seuls l'effet traitements "type d'émondes" et l'interaction traitements-humidité sont significatifs.

Le pourcentage apparent de carbone dégagé dans l'atmosphère est ajusté au modèle d'équation 3 (page 19) dont les coefficients de cet ajustement sont donnés au tableau 9.

Tableau 8 : Résultats synthétiques de l'analyse statistique des quantités de carbone (mg kg^{-1}) dégagées dans l'atmosphère à 7 jours et à 44 jours d'incubation.

pF	*Témoin*		*Gliricidia*		*Senna*	
	7 jours	*44 jours*	7 jours	44 jours	7 jours	44 jours
pF 2,5	87 (c)	296 (a)	195 (a)	609 (a)	194 (a)	529 (b)
pF 3,5	84 (c)	331 (d)	199 (a)	547 (b)	182 (b)	482 (c)

Analyse statistique à 7 et 44 jours d'incubation

F calc. Trait : 3243 (ths); Fcalc. humid. : 6,71 (hs) ; F calc. interaction TH : 13,30 (ths) CV : 2,2%

Deux moyennes affectées de la même lettre, dans une même colonne, ne différent pas par le test de Newman-Keuls à P =0,05

Analyse statistique à 44 jours à d'incubation

F calc. Trait : 269 (ths); Fcalc. humid. : 2,93 (ns) ; F calc. interaction TH : 3,94 (s) CV : 5,4%

deux moyennes affectées de la même lettre, dans une même colonne, ne différent pas par le test de Newman-Keuls à P =0,05

Tableau 9 : Coefficients des courbes cumulées de biodégradabilité des émondes.

pF	*Gliricidia*				*Senna*			
	C_1 -C_2	K (½ vie)	C_2	R^2	C_1 -C_2	K (½ vie)	C2	R2
pF 2,5	68,0	0,058 (12,0)	2,7	0,991	49,5	0,090 (7,7)	0,59	0,992
pF 3,5	42,8	0.106 (6,6)	1,6	0,991	32,8	0,142 (4,9)	0,85	0,990

Entre parenthèses sont indiqués les temps de demi-vie (½ vie) exprimés en jours

Les coefficients K calculés permettent d'apprécier un "temps de demi-vie" de la portion "biodégradable" des émondes apportées. Les valeurs de C_2 sont proches de zéro et sont tout à fait compatibles avec les valeurs théoriquement nulles au départ.

On peut, à partir de ces équations calculer un "temps de demi-vie" de la partie biodégradable des émondes (C_1 -C_2). Ce temps est plus court pour les émondes de *Gliricidia* que pour *Senna*.

Les conditions de faible humidité (pF 3,5) ont pour conséquence une diminution apparente de la proportion de produits potentiellement biodégradables mais aussi une plus grande vitesse de dégradation des produits qui restent (temps de demi-vie raccourci).

4.4. DISCUSSION

La minéralisation de N est évaluée à partir de trois paramètres: (i) l'activité nitrifiante exprimée par le rapport N-$NO3^-$ / N minéral (ii) la quantité de N minéralisé exprimée en mg kg^{-1} de $NO3^-$, de $NH4^+$ et N minéral (iii) le coefficient apparent de minéralisation de N des émondes exprimé par le rapport N minéralisé / N total des émondes.

L'effet de la nature des émondes (*Gliricidia* ou *Senna*) est très net puisque :

- lorsque l'apport est effectué sous forme de *Senna* la minéralisation apparente de l'expérience est à peu près nulle au point de vue production de N minéral avec, même, en début d'incubation une immobilisation apparente nette de N correspondant à environ 20% de N apporté. En fin d'expérience, on note pour l'humidité optimale un début de minéralisation positive mais il aurait fallu disposer de mesures supplémentaires pour confirmer cet effet ;

- lorsque l'apport est effectué sous forme de *Gliricidia* la minéralisation apparente est toujours positive avec un rythme de minéralisation nette de N suivant une cinétique de premier ordre et peu de différences entre les deux niveaux d'humidité sauf pour l'humidité optimale pour la dernière mesure où le même phénomène que pour le *Senna* est observé. Cette minéralisation conduit d'ailleurs à une "surminéralisation" de N du sol (Pourcentage apparent de N minéralisé > 100%).

La teneur en N des émondes et leur rapport C/N sont des déterminants majeurs dans l'aptitude des résidus végétaux à fournir N (Weeraratna, 1979; Buck, 1986; Xu et al., 1993 a; Myers et al., 1994). En particulier, du matériel végétal à teneur en N > 2% ou C/N < 25 libère N minéral (Myers et al., 1994). Avec le matériel végétal utilisé (émondes de *G. sepium* et de *S. siamea*) qui contiennent plus de 2% de N et un rapport C/N < 25, on devrait s'attendre à une absence d'immobilisation pendant la période d'incubation, surtout pour le *Senna*. Or, les résultats obtenus mettent en évidence une immobilisation de N de l'ordre de 20% dans le sol avec incorporation d'émondes de *S. siamea*, celle-ci étant absente dans celui avec d'émondes de *G. sepium*. On sait par ailleurs que, d'autres constituants tels que la lignine et les polyphénols peuvent modifier la qualité du matériel végétal en freinant la

décomposition et la minéralisation (Swift et al., 1979), la lignine en immobilisant N pendant la décomposition (Berg et McClaugherry, 1987) et les polyphénols en formant des complexes résistants par combinaison avec les composés azotés du matériel (Fox et al., 1990; Palm et Sanchez, 1991) ou en inhibant l'action enzymatique (Swain, 1979). Vallis et Jones (1973) ont montré que du matériel végétal à forte teneur en N mais à concentration élevée en polyphénols manifeste une immobilisation d'azote et un retard dans la minéralisation durant plusieurs semaines lorsqu'il est mis en incubation dans un sol. La teneur en polyphénols, plus élevée chez *Senna* sp que *chez Gliri*cidia sp (Palm et Sanchez, 1991), pourrait être à l'origine de cette phase d'immobilisation observée.

Les études sur la décomposition et la minéralisation de la matière organique ont souvent été réalisées dans des expériences d'incubation au laboratoire à cause des difficultés de mesure in situ (Frankenberger et Abdemagid, 1985 ; Jansen et Kucey, 1988 ; Fox et al., 1990 ; Palm et Sanchez, 1991). Certaines équations modèles d'estimation de la quantité de N minéralisé à partir de résidus culturaux ont été proposées par Vigil et Kessel (1991) . Dans notre cas, les courbes de minéralisation apparente de C des émondes peuvent être assimilées à une cinétique du premier ordre mais les proportions de produits biodégradables et les vitesses de dégradation calculées différent selon les émondes utilisées. Ces différences de comportement pourraient être expliquées par la composition chimique du matériel incorporé dans le sol (contenu en cellulose, lignine et polyphénols) comme le soulignent déjà Tenney et Waksman, (1929) et Newman et Norman (1941) cités par Wong et Nortcliff (1995). La disponibilité de N apporté par les litières dépend de la quantité de N contenue dans les hydrosolubles constituant cette litière et de l'espèce (Domenach et al., 1997).

Pour *G. sepium*, la proportion d'émondes biodégradables calculée dans cette étude est du même ordre de grandeur les résultats obtenus avec le même matériel en suivant l'évolution du poids de "bacs de litière " placés sur le terrain dans des conditions d'année sans sécheresse prononcée (70% contre 80%).

La minéralisation de N et de C est généralement influencée par les conditions d'humidité du sol. En zone soudano-sahélienne, des périodes de sécheresse et des cycles de dessiccation - réhumectation sont des processus auxquels les sols sont fréquemment soumis en conditions naturelles. A l'échelle des successions climatiques annuelles, leur effet le plus important est l'existence d'un "pic de minéralisation" de N observable à la reprise des pluies (Birch, 1964). La décomposition de résidus de plantes est également contrôlée par leur composition chimique et les conditions environnementales dans lesquelles la décomposition s'effectue (Xu et al., 1993 a). La part "potentiellement biodégradable" constituée par des produits plus stables augmente quand les conditions d'humidité sont proches de la capacité au champ c'est-à-dire à pF2.5.

La prévision approximative de la cinétique de décomposition des résidus végétaux peut se faire lorsque l'on connaît la composition biochimique (teneur en fraction soluble : hemicellulose, cellulose et lignine) alors qu'elle ne peut s'expliquer par le simple rapport C/N (Mary, 1987)

4.5. CONCLUSION

Les résultats obtenus ont fourni des premiers éléments de raisonnement de la mise en place de systèmes agroforestiers efficaces basés sur l'utilisation de légumineuses arbustives potentiellement utilisables ou en cours d'introduction en zone soudano-sahélienne du Sénégal

Il est mis en évidence deux phases dans la minéralisation de l'azote : une première phase d'ammonification et une seconde phase correspondant à une activation de la nitrification

L'incorporation d'émondes de *Gliricidia sepium* permet donc d'augmenter les quantités de N minéral en solution du sol , donc la possibilité d'utilisation par les plantes mais aussi celles de lixiviation. Par contre, la phase d'immobilisation de N, observée dans le cas d'émondes de *Senna,* réduit la capacité du sol à fournir N aux plantes mais aussi augmente les réserves de N du sol utilisables à moyen terme. L'état d'humidité du sol, assujetti à l'apparition de périodes sèches après les premières pluies d'hivernage joue un rôle important dans la minéralisation de la matière organique incorporée dans le sol. La portée agronomique de ces résultats ne peut être jugée qu'après collecte de données expérimentales obtenues en conditions réelles qui permettraient de rapprocher les vitesses de décomposition obtenues au laboratoire et la dégradation réelle des émondes *in situ.* Ces données aideraient beaucoup à la conception d'un schéma de synchronisation entre l'offre en éléments nutritifs de la biomasse arbustive et la demande exprimée par la culture annuelle qui devrait permettre de mieux gérer les interventions culturales dans un système de culture agroforestier en zone soudano-sahélien.

CHAPITRE V: ETUDE AU CHAMP DE LA CINÉTIQUE DE BIODÉGRADATION D'EMONDES DE *GLIRICIDIA SEPIUM* DANS LE SOL. RECHERCHE DE LA SYNCHRONISATION ENTRE L'OFFRE EN N PAR LES EMONDES ET LA DEMANDE EN N DU MAÏS

CHAPITRE V

ETUDE AU CHAMP DE LA CINÉTIQUE DE BIODÉGRADATION D'EMONDES DE *G. SEPIUM* DANS UN SOL FERRUGINEUX TROPICAL PEU LESSIVE DU CENTRE SUD SÉNÉGAL ET CONSÉQUENCE SUR L'ALIMENTATION AZOTÉE DU MAÏS

5.1. INTRODUCTION

Pour assurer la pérennité des rendements agricoles, il est nécessaire de mettre en oeuvre des méthodes tendant à équilibrer le bilan des éléments nutritifs. En ce qui concerne l'azote, cet équilibre peut être atteint par deux voies : la fertilisation, la fixation de N_2 par les plantes et par les arbres associés. Malheureusement la première voie doit être écartée pour l'Afrique de l'Ouest en raison des faibles quantités d'engrais apportées par les agriculteurs (5 à 10 kg ha^{-1} an^{-1}) (Gigou, 1995). En ce qui concerne la deuxième voie, on sait que l'arbre joue un rôle primordial dans les systèmes agro-pastoraux de l'Afrique de l'Ouest. Une des attentes de la mise en place de systèmes de culture agroforestiers, en l'occurrence la culture en couloirs, réside dans la fourniture de N aux plantes et dans le maintien via l'amélioration du statut organique des terres. Les jeunes pousses des haies sont coupées 2 à 4 fois par an et les émondes sont utilisées comme engrais vert ou disposées en mulch sur les parcelles cultivées situées entre les haies (Kang et al., 1981). L'efficacité de N des émondes sur le rendement est liée à la synchronisation entre l'offre et la demande en N (Myers et al., 1994). En zone tropicale humide de nombreux travaux ont été conduits notamment au Nigéria ; dans ce pays à pluviométrie bimodale, Yamoah et al (1986 b) ont montré que les émondes de *G. sepium* pouvaient apporter 71 % de N nécessaire au maïs. En zone tropicale semi-aride, les études de même type sont rares; en Australie, Xu et al. (1993 a ; 1993 b) constatent que cette pratique améliore significativement les rendements du maïs cultivé entre des haies de *L. leucocephala*. Au Sénégal, de telles données restent à acquérir pour aider à la mise en place de systèmes agroforestiers durables. Cette étude a été menée en vue de déterminer la cinétique de biodégradation et de libération de N d'un mulch d'émondes de *G. sepium* en relation avec la demande en N par le maïs cultivé en conditions pluviales du centre sud du Sénégal. A l'instar du calcul effectué dans le cas d'un engrais azoté, on détermine le coefficient apparent d'utilisation (C.A.U %) et l'indice d'efficience (I.E) de N des émondes.

5.2. TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

5.2.1. Description du site d'expérimentation

L'étude est conduite à la station expérimentale de Nioro du Rip de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) dans le Centre Sud du Sénégal.

Le climat de cette zone est caractérisé par une pluviométrie unimodale, la saison des pluies, donc de culture, étant comprise entre mi-juin et mi-octobre. La figure 13 illustre les fréquences des pluies sur une période de 45 ans (1950 - 1995) à Nioro du Rip et montre les seuils de probabilité des pluies 2, 5 et 8 années sur 10. Cette figure 13 permet de classer l'année 1995 parmi celles à pluviométrie satisfaisante au seuil minimum de pluies survenant 5 à 8 années sur 10. La pluviométrie de 1995 est légèrement supérieure à la moyenne avec une bonne répartition des pluies durant tout le mois d'août correspondant à la phase 'montaison-floraison', période critique des besoins en eau du maïs; on y remarque quelques phases de pluies 'excédentaires' aux mois de juillet et d'août.

Le sol est de type ferrugineux tropical peu lessivé, il est très sableux (taux d'argiles+limons = 6,4 ; sables = 93,6 %), sa teneur en matière organique est faible (C = 0,27 % ; N = 0,025 % ; C/N = 10,8). Il est pauvre en P assimilable (10 mg kg^{-1}) et en potassium échangeable (0,07 cmol eq. kg^{-1}), le pH eau est acide (5,52) et la capacité d'échange (1,34 cmol eq. kg^{-1}) au pH du sol est presque entièrement saturée par le calcium et le magnésium (respectivement 0,87 et 0,26 cmol eq. kg^{-1}).

5.2.2. Matériel végétal utilisé

La variété de maïs CP 75 utilisée comporte les caractéristiques suivantes:

- structure: variété composite;
- origine: Centre National de Recherches Agronomiques de Bambey au Sénégal;
- date de création: 1980;
- dates de floraison: mâle (38 jours), femelle (43 jours);
- grain: corné, rond et jaune;
-cycle semis-maturité: 75 jours;
- rendement "espéré" en milieu paysan dans le Centre Sud du Sénégal: 2500 kg ha^{-1}.

5.2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comprend 15 parcelles élémentaires de 18,9 m² chacune (annexe 5).
Trois traitements sont mis en comparaison selon un dispositif en blocs complets randomisés à 5 répétitions:

-une culture de maïs sans fertilisation azotée mais recevant une fumure d'entretien P K recommandée pour la zone (30 P_2O_5 et 30 K_2O kg ha^{-1}) (T1);

-une culture de maïs recevant une fertilisation azotée minérale (100 kg N ha^{-1}) fractionnée en deux apports en plus de la fumure P K (T2);

-une culture de maïs où des émondes de *G. sepium* sont apportées en surface à raison de 3 t MS ha^{-1} soit 5,7 kg M.S par parcelle en plus de la fertilisation P K (T3).

Les émondes sont prélevées en début de saison de pluies (juste avant le semis du maïs) sur des haies d'arbres âgés de 2 ans, situées à la même station d'expérimentation, en dehors du dispositif; elles sont constituées de feuilles et de brindilles (de diamètre inférieur à 3 mm).

La composition moyenne (de 8 échantillons de 100 g de MS chacun) est de: N % =3,50±0,26; P % = 0,20±0,02, K % = 1,72±0,58, Ca % = 1,62±0,68 et Mg % = 1,04±0,63.

Chaque parcelle comprend 8 lignes de maïs de 4,5 m de long, maïs (variété CP 75) semé en sol humide après l'épandage des émondes à un écartement de 0,60 m entre lignes et de 0,30 m sur la ligne à raison de 4 graines par poquet démarié par la suite à 1 plant environ 15 jours après semis (JAS).

Avant l'épandage des émondes recouvertes d'environ 5 cm de terre, toutes les parcelles ont été, préalablement au semis, travaillées par un passage de cover-crop suivi d'une reprise d'un pseudo-labour par hersage.

L'apport de N sous forme d'urée est fractionné en 2 doses égales, l'une à 27 JAS et l'autre à 41 JAS.

La fumure minérale P K est apportée sous forme de phosphate supertriple (67 kg ha^{-1}) et de chlorure de potassium (50 kg ha^{-1}) au moment du semis par un épandage à la volée.

Une protection phytosanitaire ainsi que des entretiens des parcelles sont assurés 'à la demande'.

Les teneurs en N du maïs sont déterminées à partir d'un échantillon composé de 4 pieds prélevés sur des lignes réservées à cet effet dans chaque parcelle du dispositif.

Le rendement du maïs et les diverses composantes du rendement sont mesurés sur les 2 lignes centrales de chaque parcelle élémentaire de l'essai. Sur ces lignes on a déterminé :

- le nombre de pieds présents après démariage,
- le nombre de pieds présents à la récolte et le nombre de pieds fertiles,
- le nombre et le poids sec des épis récoltés,
- le nombre et le poids sec de grains par épi (sur 5 épis pris au hasard par parcelle),

- les poids sec des pailles et des grains par parcelle.

L'étude de la cinétique de la biodégradation et de la libération de N des émondes de *G. sepium* est conduite parallèlement à la précédente et sur des parcelles voisines.

La méthode utilisée est inspirée de celle mise au point par Yamoah et al. (1986 b). Les émondes prélevées sur des repousses d'arbres de première coupe de haies de *G. sepium* âgées de 2 ans sont placées dans des sacs en toile imputrescible aérée (sacs de 30 cm x 40 cm et mailles de 1 mm) à raison de 165,2 g de matière fraîche (104,9 g de matière sèche) par sac. Vingt quatre sacs ont été disposés dans les allées du dispositif expérimental précédent (annexe 6) et incorporés dans le sol sur une profondeur de 5 cm, puis recouverts de terre au moment du semis du maïs. A intervalles réguliers de 15 jours, quatre d'entre eux sont retirés du sol afin de déterminer leur poids sec après séparation de la matière minérale et des émondes. Les échantillons ainsi nettoyés ont été séchés à l'étuve maintenue à 70 °C jusqu'à poids constant. Après broyage et homogénéisation de ces derniers, leur teneur en N est déterminée à l'aide d'un appareil de dosage CHN Leco. Nous avons de même analysé les plantes de maïs prélevées en cours de cycle.

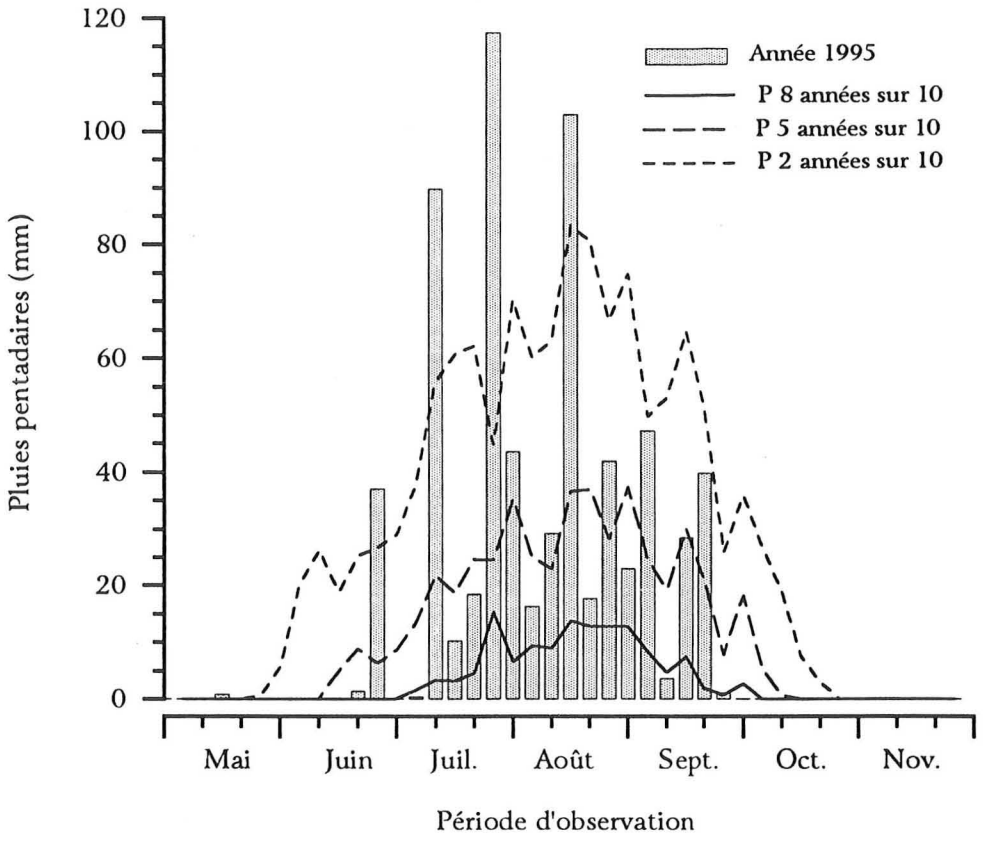


Figure 13 : Pluies pentadaires à Nioro du Rip et seuil minimum de pluies survenant 8, 5 et 2 années sur 10 pendant la pentade concernée (analyse de la période 1950-1995)

5.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.3.1. Cinétiques de biodégradation et de libération de N des émondes de *Gliricidia sepium*

La perte de MS (fig. 14) est calculée en ajustant la cinétique de biodégradation à une loi du premier ordre (équation 5, page 20). Des modèles similaires ont été utilisés par Wieder et Lang (1982) et Ezcurra et Becerra (1987) dans des études de décomposition de feuilles d'arbres. On peut, à partir de cette loi de cinétique de biodégradation, calculer un temps de demi-vie ($t_{0,5}$), temps nécessaire pour que 50 % de la partie biodégradable des émondes sont effectivement biodégradés (relation 6). Ce temps de demi-vie ($t_{0,5}$) est de 20 jours (fig. 14). Il est conforme à celui trouvé par Read et al. (1985) pour *Leucaena leucocephala* au Nigéria mais légèrement inférieur à celui observé (22 jours) par Budelman (1988) pour *G. sepium* en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). La valeur de $t_{0.5}$ trouvée dans cette expérience souligne la rapidité de la biodégradation des émondes de *G. sepium* qui résulterait de leur forte teneur en N (Weerartna, 1979; Palm et Sanchez, 1991) (la teneur en N des émondes de *G. sepium* utilisées dans notre expérience est de 4,9 %).

Les quantités de N restant dans les émondes en cours de biodégradation sont ajustées au même modèle utilisé pour la MS (fig. 15).

Cette figure 15 montre que le temps de demi-vie $t_{0.5}$ de la libération de N est de 9,2 jours. Dans ces conditions, en zone soudano-sahélienne où la saison de culture est généralement de courte durée (3 à 4 mois), où les sols sont pauvres en matière organique, *G. sepium* à biomasse foliaire rapidement biodégradable est une espèce légumineuse adaptée pour les systèmes agroforestiers dans cette zone. Cette espèce permettrait, via les émondes, une mise à disposition des cultures de quantités importantes de N durant les premières phases d'installation de la culture et donc une meilleure croissance végétative en début de cycle du maïs, période importante pour un meilleur accès à l'eau et aux éléments nutritifs. Cependant, au regard des risques de lixiviation à cause des pluies diluviennes qui sévissent dans cette zone sur une courte durée, une période optimale d'émondage des haies de *G.sepium* est à rechercher afin de tendre vers une synchronisation entre l'offre et la demande en N.

5.3.2. Effets comparés du mulch d'émondes de *G. sepium* et de l'urée sur le rendement du maïs

5.3.2.1. Effet sur la croissance et le développement des parties aériennes (tiges+feuilles) du maïs

La figure 16 représente la quantité cumulée de MS des parties aériennes du maïs au cours de la période de culture. Après une période de faible production de MS qui dure jusqu'au stade 6-feuilles,

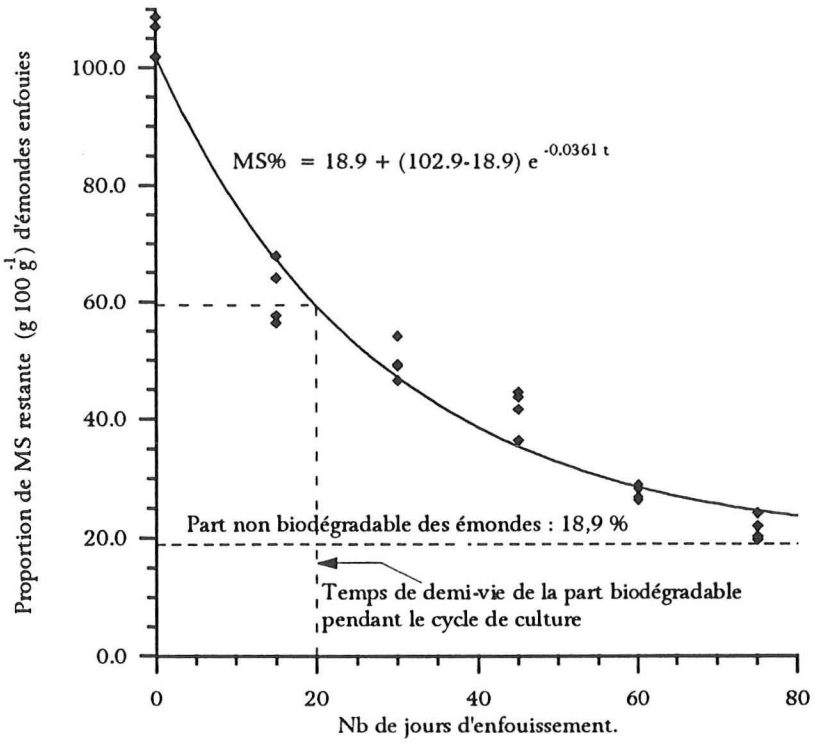


Figure 14 : Cinétique de biodégradation des émondes de *Gliricidia sepium* au champ

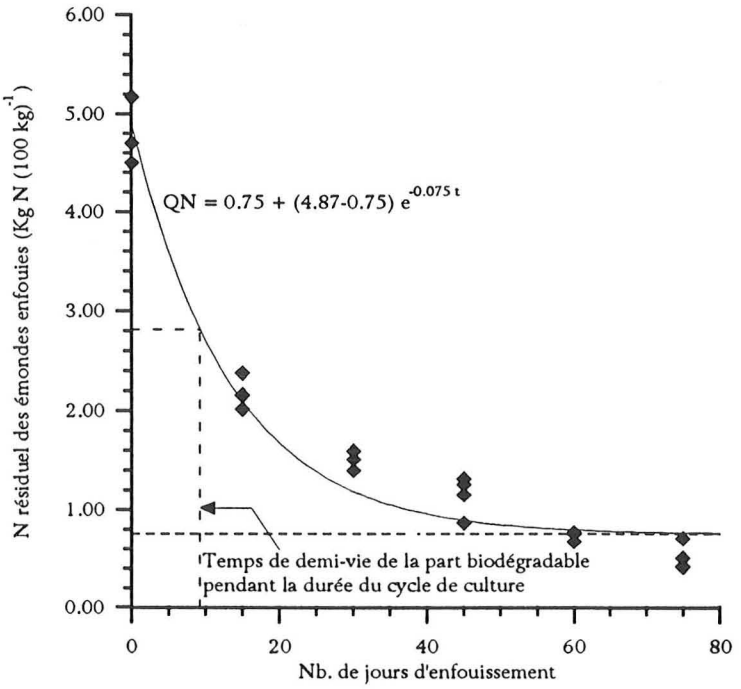


Figure 15 : Cinétique de minéralisation de N des émondes de *Gliricidia sepium* au champ

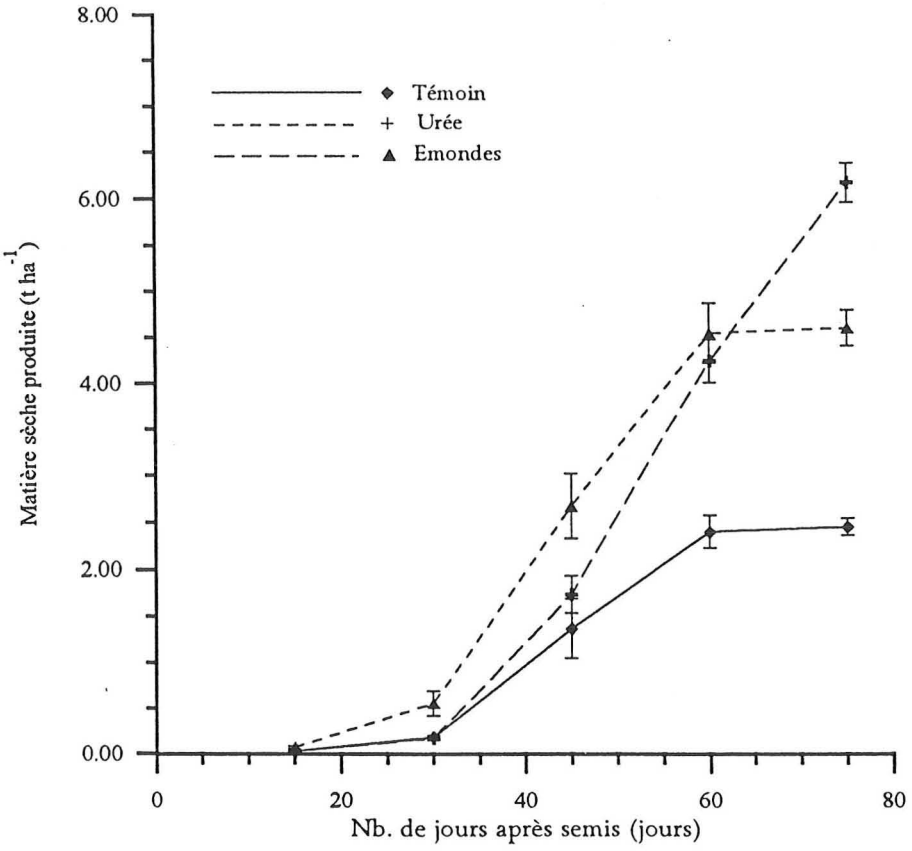


Figure 16 : Evolution du poids matière sèche des parties aériennes du maïs au cours du cycle

le poids sec de MS s'accroît rapidement jusqu'au stade floraison. De la floraison à la maturité, cette production de MS est stabilisée sauf pour le traitement T2 (avec urée). A 75 JAS, la production de MS des plantes du traitement (T3) avec émondes 4,5 t MS ha^{-1}) est plus élevée que celle des plantes témoin (T1) produisant seulement 2,3 t MS ha^{-1} et inférieur à celle des plantes avec urée (6,2 t MS ha^{-1}).

5.3.2.2. Effets sur les composantes du rendement de maïs

Le nombre d'épis, le nombre de grains par épi et le poids moyen de grains par épi sont significativement accrus par l'engrais et par les émondes (tableau 10).

Tableau 10: Effets des émondes de *G. sepium* et de l'engrais minéral (urée) sur les composantes de rendement du maïs (var.CP75)

Traitements	Nombre de plantes par hectare	Nombre d'épis par plante	Nombre de grains par épi	Poids sec de 1000 grains (g)
T1 (témoin)	52206 a*	0,62 a	87,75 a	114 a
T2 (urée)	55500 a	1,14 c	215,50 b	145 b
		(0,52)	(127,75)	(31)
T3 (émondes)	55147 a	0,89 b	198,75 b	152 b
		(0,27)	(111,00)	(38)
CV (%)	11.90	16,00	13,45	4,30

* Les chiffres affectés de la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différents par le test de classement de Newman-Keuls à p = 0.05.

Les chiffres entre parenthèses indiquent les accroissements par rapport au témoin

La supériorité de l'engrais sur les émondes est enregistrée sur le nombre d'épis par plante. On sait que le nombre d'épis est déterminé très tôt dans le cycle de la plante et que dans notre expérience la quantité de N, disponible, est plus importante dans le cas du traitement avec émondes (120 N kg ha^{-1}

contre 100 N kg ha^{-1} pour l'urée). La différence du nombre d'épis par plante observée entre les traitements avec émondes (0,89) et avec urée (1,14) pourrait s'expliquer par un accès plus facile à N et / ou par une moins bonne nitrification pour le traitement avec émondes. Les deux autres composantes du rendement sont statistiquement équivalentes pour les traitements avec émondes et urée. Les rendements en grains, en pailles, en M.S totale et l'absorption de N total par la plante dans les parties aériennes sont indiqués dans le tableau 11.

Tableau 11: Effets des émondes de *G. sepium* et de l'engrais minéral sur le rendement et N total du maïs (var.CP75) à la récolte.

Traitements	Grains (kg ha^{-1})	Pailles (kg ha^{-1})	Total M.S * (kg ha^{-1})	Exportations N (kg ha^{-1})
T1 (témoin)	511 c**	1643 c	2443 c	19,7 c
T2 (urée)	2240 a	3182 a	6163 a	77,9 a
	(1729)	(1539)	(3720)	(58,2)
T3 (émondes)	1714 b	2778 b	4589 b	65,8 b
	(1203)	(1135)	(2147)	(46,1)
CV (%)	11,60	5,60	6,9	8,2

* Total M.S = grains + pailles + résidus de battage (rafles + spathes)
** Les chiffres affectés de la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différents par le test de classement de Newman-Keuls à p = 0.05.

Les chiffres entre parenthèses indiquent les accroissements de rendement par rapport au témoin

Ils sont très nettement accrus sous l'action des émondes se rapprochant ainsi de ceux obtenus sous l'effet de l'urée. Les rendements en grains sont augmentés de 235 % par les émondes (338 % par l'urée), par rapport au témoin. Les exportations en N par le maïs témoin est de 19,7 kg N ha^{-1}. L'action des émondes permet d'atteindre 65,8 kg N ha^{-1} (se rapprochant des 78 kg N ha^{-1} obtenus par l'urée)

5.3.3. Cinétique de libération de N des émondes de *G. Sepium* et absorption de N par le maïs (CP75)

Quel que soit le traitement, l'absorption de N en cours de cycle par le maïs est empiriquement modélisée par la fonction logistique (équation 9, page 21) dont les coefficients pour chaque traitement sont donnés au tableau 12.

Tableau 12 : Valeurs des paramètres de l'équation (4): $y = y_e (1 + e^{(a-bt)})^{-1}$ en fonction des traitements (y = quantités de N absorbé au temps t ; y_e = quantité limite de N absorbable ; a = constante d'intégration ; b = constante de proportionnalité).

Traitements	Valeurs des paramètres		
	y_e	a	b
T1 (témoin)	32	3,279	0,0762
T2 (urée)	138	6,350	0,1101
T3 (émondes)	100	4,972	0,0865

A partir de ces équations, on apprécie la demande instantanée en N du maïs en cours de cycle. La cinétique de minéralisation de N pendant la biodégradation des émondes de *G. sepium* en relation avec l'absorption de N est illustrée par la figure 17. Du semis jusqu'à 55 JAS, l'absorption de N est plus importante avec émondes qu'avec urée. Deux semaines après le deuxième apport d'urée, soit 41 JAS, l'absorption de N dépasse celle du traitement avec émondes jusqu'à la maturité. A la récolte, les émondes de *G. sepium* ont libéré 120 kg N ha-1.

5.3.4. Efficacité des émondes sur le maïs

Cette efficacité est appréciée selon deux critères : le coefficient apparent d'utilisation (C.A.U) et de l'indice d'efficience (I.E) que l'on compare à ceux obtenus sur maïs ayant reçu 100 kg N ha^{-1} d'urée. Le C.A.U (%) est le supplément de N absorbé sous l'action de l'engrais rapporté à la quantité de N engrais apportée (Hébert, 1971) et l'I.E est la production d'une culture rapportée à la quantité de N

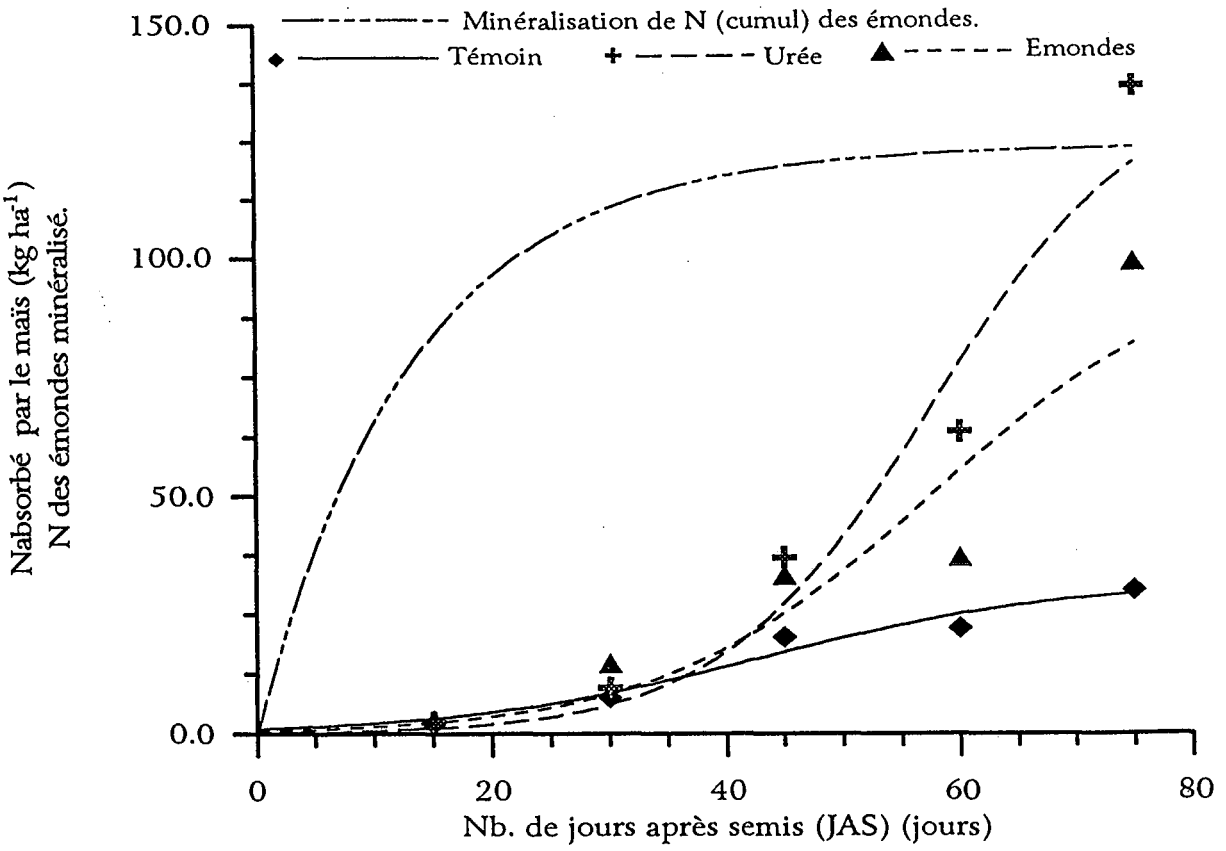


Figure 17: Cinétique d'absorption de N par le maïs et de minéralisation de N des émondes de *Gliricidia sepium*

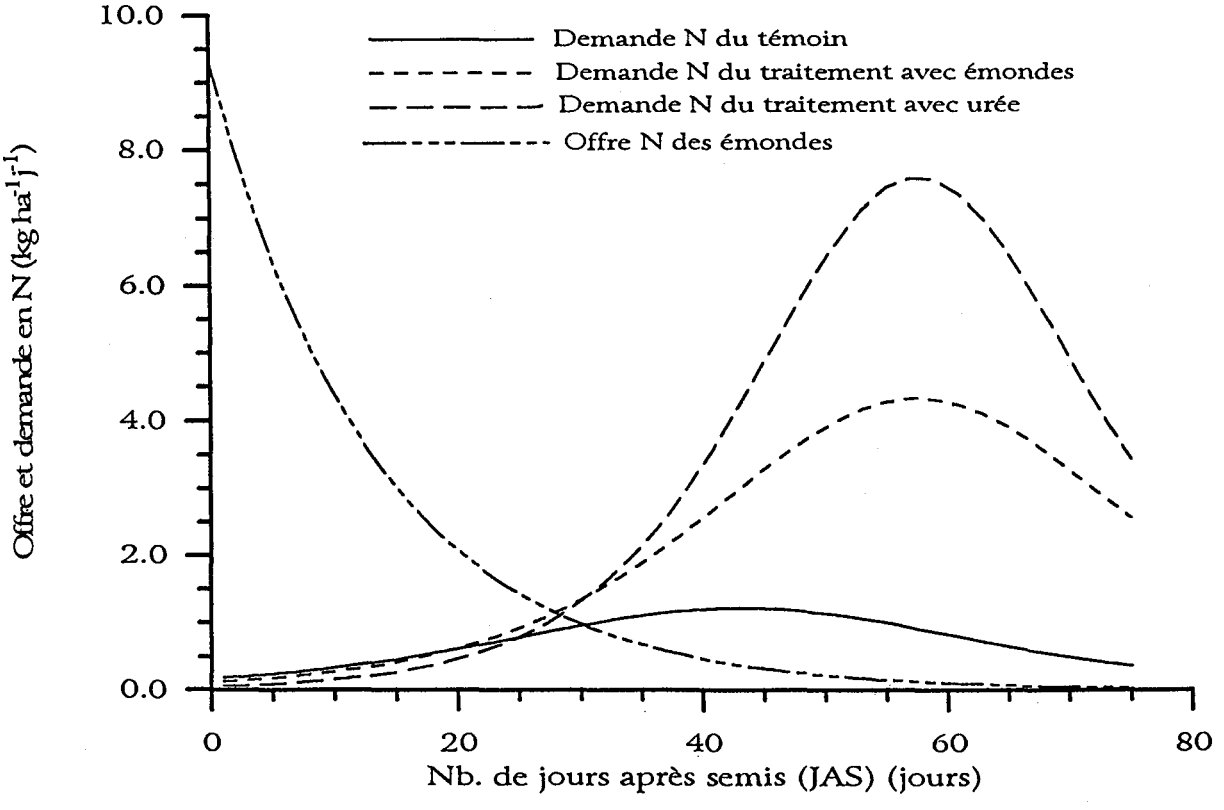


Figure 18: Synchronisation de l'offre en N des émondes de *Gliricidia sepium* et de la demande en N du maïs

absorbé par cette culture (COMIFER, 1987).

Le C.A.U % calculé ici se rapporte à la partie biodégradable des émondes. Dans les conditions de l'essai, le CAU %, pour 120 kg N-émondes ha^{-1} apportés, est de 38,4 % ; celui de l'urée dans le même essai est de 58,2 % pour 100 kg N ha^{-1} apportés. Ramenés à des quantités égales de N apporté (100 kg N ha^{-1}), nous avons approximativement 46 % vs 58 %. L'I.E se rapporte au taux de conversion de N absorbé en rendement grains; pour les émondes, il est proche de celui de l'urée (26 vs 29). Ces résultats attestent de l'efficacité des émondes sur le rendement du maïs. Le potentiel de production de la variété de maïs est de 2500 kg grains ha^{-1} dans la zone. Le traitement avec 100 kg N ha^{-1} d'urée permet d'approcher ce potentiel (2200 kg ha^{-1}). La demande en N du maïs avec émondes est de 65.8 kg ha^{-1}, ce qui représente 70 à 75 % de la demande en N (78 kg N ha^{-1}) du maïs ayant reçu l'urée; le rendement de ce maïs avec urée (2200 kg ha^{-1}) est proche du rendement potentiel de la variété dans la zone (2500 kg ha^{-1}) ; ce résultat confirme l'efficacité des émondes.

5.3.5. Optimisation du C.A.U %

L'adéquation entre l'offre et la demande en N, des quantités de N est illustrée à la figure 18. L'offre instantanée en N par les émondes de *Gliricidia sepium* est plus importante en début à un moment où les besoins en N du maïs sont faibles. L'absorption de N par maïs est maximale à 52 JAS pour les plantes ayant reçu l'urée (7,5 kg N ha^{-1} $jour^{-1}$) et à 45 JAS pour les plantes avec émondes (4,25 kg N ha^{-1} $jour^{-1}$). L'offre instantanée en N du sol *sensu stricto,* évaluée par l'absorption de N des plantes du témoin, est très faible avec un maximum de 1,25 kg N ha^{-1} $jour^{-1}$ à 36 JAS. Ces résultats montrent que l'application d'émondes de *Gliricidia sepium* au moment du semis ne permet pas une synchronisation entre l'offre et la demande en N. Pour bénéficier dans les meilleures conditions de N libéré par les émondes, le semis du maïs aurait dû être effectué 2 à 3 semaines avant l'émondage (période souhaitable pour la synchronisation). Dans le cas d' un émondage tardif on pourrait s'attendre à ce que les jeunes plants de maïs soient affectés par l'ombrage. Cependant, les modifications pédologiques par l'ombrage du couvert ligneux peuvent stimuler l'activité microbienne et le taux de minéralisation du sol et jouer un rôle important dans les régions où la faible teneur en N constitue une contrainte pour la croissance de cultures (Wilson, 1990). Par contre, cela permettrait d'utiliser des variétés de maïs à cycle plus long (90 jours) dont les capacités de production sont plus importantes que celle de la variété de "75 jours" utilisée. Ces informations s'avèrent intéressantes dans la gestion du calendrier cultural d'un maïs avec enfouissement d'émondes de *G sepium* dans un système agroforestier telle que la culture en couloirs.

5.3.6. Synchronisation avec les besoins en eau du maïs en fonction de la pluviométrie

La culture du maïs sous mulch d'émondes obtenues dans un système agroforestier nécessite une combinaison optimale des dates de semis de la céréale et d'émondage de l'arbre permettant d'assurer la synchronisation entre l'offre et la demande afin d'atteindre le rendement "espéré", lié au cycle pluviométrique de la zone. Nous émettons l'hypothèse que le système agroforestier ne sera viable que s'il autorise une date de semis dans une période dite période optimale de semis au delà de laquelle le rendement baisse de façon significative.

Pour vérifier cette hypothèse, une simulation de la satisfaction des besoins en eau du maïs est faite pour diverses conditions. Les choix suivants ont été faits :

1/ prise en compte des séries pluviométriques et d'évapotranspiration potentielle (ETP) décadaires de la zone (Nioro du Rip) entre 1950 et 1955,

2/ réserves utiles en eau maximales du sol de 140 mm et de 190 mm,

3/ variétés de maïs à 75 jours et à 90 jours de cycle avec leur profondeur d'enracinement,

4/ dates de semis échelonnées de 10 jours en 10 jours à partir du 25 juin jusqu'au 20 août.

Le traitement des données est effectué à l'aide du logiciel SARRBIL (CIRAD-CA) qui permet de traiter en séries les simulations pour les données sur la culture et les paramètres du sol et de réaliser une analyse fréquentielle des résultats obtenus. Dans un premier temps, on calcule le taux de satisfaction des besoins en eau de la culture sur l'ensemble du cycle et sur la série pluviométrique 1950-1995 et on situe la position du taux de satisfaction de ces besoins en eau atteint au moins 8 années sur 10.

Les résultats obtenus en faisant varier les dates de semis, la longueur du cycle cultural (choix variétal) et la réserve en eau facilement utilisable du sol (R.E.U), sont synthétisés par la figure 19.

Si l'on considère que le seuil d'au moins 80 % (ETR/ETM) de satisfaction des besoins en eau est satisfaisant (Dancette, 1983), on peut définir les périodes de semis convenables pour les diverses situations (tableau 13). On observe que la période optimale de semis varie de 46 à 51 jours à partir du 25 juin pour une variété de maïs à cycle de 75 jours et de 33 à 46 jours à partir du 20 juin pour une variété à cycle de 90 jours. Nous observons que, dans notre essai, il aurait été souhaitable d'avancer) le semis du maïs ou de retarder la date d'émondage de 2 à 3 semaines pour atteindre la synchronisation entre l'offre et la demande en N (fig. 6). On détermine une période optimale de semis du maïs, tout en assurant une bonne satisfaction des besoins en eau (80 %), au cours de laquelle le semis du maïs peut être effectué par rapport à la date d'émondage pour atteindre cette synchronisation.

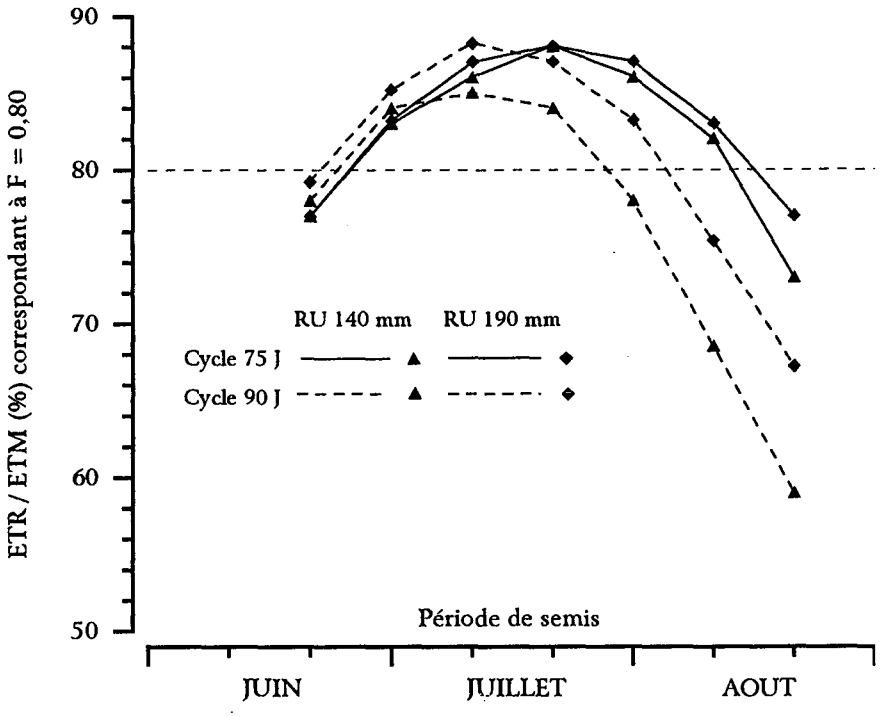


Figure 19 : Taux de satisfaction des besoins en eau du maïs sur l'ensemble du cycle végétatif: hypothèse selon la longueur du cycle (75 j -------- et 90 j - - - - - - -) et de la réserve utile en eau (R.U) maximale (◆ 190 mm et ▲ 140 mm pour 2 m de profondeur du sol)

Tableau 13: Périodes optimales de semis du maïs assurant 80 % de satisfaction de ses besoins en eau dans la zone écologique du Centre Sud Sénégal.

Réserve utile en eau du sol	Variétés de maïs à cycle de :	
	75 jours	90 jours
140 mm	du 25 juin au 10 août	du 22 juin au 25 juillet
190 mm	du 25 juin au 15 août	du 20 juin au 5 août

Cette démarche permet donc, dans une zone donnée, de connaître la marge de manoeuvre sur les dates d'émondage et de semis dont on dispose, fondée sur la période optimale de semis de la céréale. Cet outil pourrait être amélioré par une meilleure prise en compte des périodes de stress pouvant intervenir en cours de certaines phases critiques comme la floraison et le remplissage du grain.
Sur un plan général, connaissant les indicateurs d'offre potentielle en N et de demi-vie des émondes mesurables en laboratoire (voir chapitre IV), les données pluviométriques sur une longue période, les caractéristiques des sols de la zone et les caractéristiques de la variété de céréale, cette démarche pourrait déboucher sur un modèle simple d'aide à la décision pour la mise en oeuvre de la culture en couloirs dans les régions semi-arides où la pluviométrie est un facteur limitant primordial de la production agricole.

5.4. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de bien décrire la cinétique de biodégradation des émondes de *G. sepium* par un modèle exponentiel d'équation: $Y = Y_r + (Y_0 - Y_j)\ e^{-k\ t}$ et d'apprécier la vitesse de biodégradation et la quantité de N pouvant être libérée des émondes de *G. sepium* dans les conditions écologiques de la zone soudano-sahélienne du Sénégal. Le temps de demi-vie du mulch d'émondes de *G. sepium* est de 20 jours. La quantité de N libérée par les émondes, atteint 120 kg N ha^{-1} ; cette quantité largement supérieure à l'absorption de N (78 kg N ha^{-1}) du maïs (var. CP 75) ayant reçu 100 kg N ha^{-1} sous forme d'urée et dont le rendement est proche du rendement potentiel. L'application de mulch d'émondes de *G. sepium* améliore le rendement du maïs et permet donc de réaliser une

économie de 66 kg N ha^{-1} équivalent-engrais azoté. Cependant, dans la pratique cette économie doit être modulée par la "perte" en surface cultivable qu'impose la culture de l'arbre. Pour que cette réduction de surface ne soit perçue comme un handicap par le paysan, il importe que la production de bois et la possibilité de cultiver une légumineuse entre les haies d'arbres après émondage soient prises en compte. Il importe également de prendre en compte la concurrence entre ligneux et cultures qui peut l'emporter sur les avantages du paillage en zone semi-aride (Ong, 1994). En zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest où la pluviométrie est un facteur limitant de la production agricole et forestière, le choix d'espèces ligneuses doit porter non seulement sur celles fixatrices d'azote et à croissance rapide, mais et surtout prendre en compte la complémentarité de l'enracinement des ligneux (à racines profondes et non traçantes) et des cultures (racines superficielles). Ceci étant, *G. sepium* est une espèce efficace dans la fourniture de N au maïs. Toutefois, une attention particulière doit être portée à la gestion des coupes des haies en relation avec la date de semis du maïs afin d'assurer une synchronisation de l'offre en N du mulch d'émondes et de l'absorption de N par le mais. Nous définissons aussi une période de semis optimale de la céréale permettant d'assurer le rendement "espéré" lié aux conditions pluviométriques de la zone ; c'est durant cette période que pourra être décidée la date optimale d'émondage permettant d'atteindre la synchronisation offre et demande en N. Cette simulation débouche un modèle simple d'aide à la décision.

CHAPITRE VI. CONTRIBUTION DE N DES EMONDES DE *GLIRICIDIA SEPIUM* ET DES AUTRES SOURCES DE N A L'ALIMENTATION AZOTÉE DU MAÏS EN CULTURE EN ALLEES

CHAPITRE VI

CONTRIBUTION DE N DES EMONDES DE *GLIRICIDIA SEPIUM* ET DES AUTRES SOURCES DE N A L'ALIMENTATION AZOTÉE DU MAÏS EN CULTURE EN ALLEES

6.1. INTRODUCTION

Les premières expérimentations relatives à la culture en couloir remontent des années 1970 sous l'égide de l'IITA. Après une vingtaine d'années de recherche, il faut reconnaître que cette technologie est encore loin d'être au point, malgré l'intérêt qu'elle présente dans les régions à forte pression démographique (Adegbehin et Igboanugo, 1990). En effet, les chercheurs sont confrontés à des problèmes qui limitent l'application du système sur le terrain. Parmi ces problèmes, nous retenons les trois suivants :

(a) la fertilité du sol: l'insuffisance de l'apport de matière organique provenant de la taille fréquente des haies pour maintenir la fertilité des sol. Le système reste dépendant, dans la plupart des cas, d'apports d'engrais minéraux complémentaires (Cobbina et al., 1989; Ghuman et Lal, 1990; Yamoah et al., 1986 a; 1986 b);

(b) la compétition pour la lumière : la mise en culture gène la croissance des ligneux dans la phase d'installation, relation qui s'inverse par la suite; les haies doivent être taillées pour enrayer l'effet de l'ombrage sur les cultures (Duguma et al., 1988; Jama et al., 1990);

(c) l'interaction racinaire à l'interface arbre / culture : la concurrence entre les racines de l'arbre et celles de la culture.

Au Sénégal, traditionnellement la culture associée arbre / cultures annuelles est pratiquée. Cette culture consiste généralement en des plantations de haies d'arbres: anacardiers, manguiers, eucalyptus, prosopis ...etc entre lesquelles sont cultivées des céréales en rotation avec de l'arachide (PRECOBA, 1982). Des essais récents d'introduction d'espèces arbustives de légumineuses tels que *Gliricidia sepium* et *Senna siamea* (ISRA, 1992) ont révélé des potentialités importantes pour l'agroforesterie. Cependant en préalable à la mise en oeuvre de tels systèmes agroforestiers, particulièrement en zone semi-aride, nous devons nous interroger d'abord sur la durabilité de tels systèmes et les modalités de leur mise en oeuvre en fonction de la variabilité du milieu (sol, climat, pression foncière) et en fonction de la diversité des exploitations (objectifs des agriculteurs, moyens et contraintes socio-économiques). C'est ensuite que nous devons porter des efforts sur l'amélioration de la fixation de N_2 et les problèmes de compétition avec la culture associée, sur la lutte contre

l'érosion, sur le maintien de la matière organique et des propriétés physiques du sol, sur le recyclage efficace des éléments nutritifs. Les mécanismes par lesquels l'arbre joue un rôle de conservation du sol ont été revus et résumés par Young (1989 b) sous formes de "dix hypothèses pour la recherche sol/agroforesterie" (annexe 6). Deux autres hypothèses ont été avancées par d'autres auteurs : 1) les arbres procurent également de l'ombrage qui favorise la croissance de la végétation sous strate ligneuse grâce notamment à l'activation de la minéralisation de N dans le sol : c'est la "onzième hypothèse pour la recherche sols/agroforesterie" de Wilson (1990) et 2) à l'interface ligneux / culture en couloirs, il existe une interaction entre racines des arbres et racines des cultures, en particulier les racines d'arbres fixateurs de N_2 portent davantage de nodosités aux environnements immédiats des plantes non fixatrices de N_2 : c'est la "douzième hypothèse pour la recherche sols/agroforesterie" de van Noordwijk et Dommergues (1990).

Les hypothèses de travail que nous développons dans la présente étude se rattachent i) à l'hypothèse N°4 de Young ayant trait à l'accroissement des apports de N dans le système agroforestier par la ligneuse fixatrice de N_2 et ii) à l'hypothèse N°6 de Young sur la valorisation et le recyclage des éléments nutritifs, notamment N.

L'objectif du présent travail est d'étudier la contribution des émondes de légumineuses arbustives adaptées dans la zone à la nutrition azotée et au rendement du maïs.

La mesure de la contribution des différentes sources d'azote (émondes, engrais et sol) à l'alimentation azotée du maïs est fondée sur la méthode isotopique ^{15}N. Deux expériences sont conduites; l'une en milieu semi-contrôlé (lysimètres) en conditions non limitantes ; l'autre dans les conditions réelles de la culture en couloirs, au champ.

6.2. TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

6.2.1. Expérience en lysimètres

Les lysimètres sont de forme parallélépipédique de dimensions 0.34m x 0.34m x 0.40m. Ils sont remplis de terre prélevée en saison sèche dans l'horizon labouré d'un sol de la station de Nioro du Rip après une jachère de 2 ans. Ce sol est de type ferrugineux tropical peu lessivé (ultisol à tendance alfisol) dont les caractéristiques physico-chimiques sont indiquées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé dans l'expérience en lysimètres.

Caractéristiques	Valeurs moyennes
Argile + limon (%)	7,4
pH (eau)	5,52
pH (KCl)	4,92
C (%)	0,272
N total (%)	0,025
P assimilable (mg kg^{-1})	25,4
Bases échangeables (cmol eq kg^{-1})	
K	0,07
Ca	0,87
Mg	0,26
Na	0,02
CEC (cmol eq kg^{-1})	1,34

Le sol est préalablement séché et tamisé finement de façon à avoir une homogénéité de texture. Au remplissage, la terre est tassée jusqu'à une densité apparente voisine de celle du sol au champ soit 1.5, ce qui correspond à un poids de 70 kg de terre par lysimètre. Des émondes (feuilles + brindilles: de diamètre inférieur à 3 mm) de *G.sepium* et *S. siamea* sont récoltées sur des repousses d'une première coupe de haies d'arbres. Quatre échantillons de chaque espèce sont séchés à l'étuve maintenue à 70 °C pour la détermination de la MS. Les émondes sont mélangées à la couche superficielle de 5 cm de terre. La composition chimique des émondes utilisées est indiquée dans le tableau 15.

Tableau 15 : Composition chimique des émondes issues de repousses d'une première coupe de haies d'arbres âgés de 2 ans (feuilles+brindilles de $\phi < 3$ mm) de *G. sepium* et de *S. siamea* utilisées dans l'essai en lysimètres.

Espèces		N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Senna siamea	Moyenne	2,13	0,119	0,616	2,156	0,294
	Écart-type*	0,16	0,026	0,194	0,617	0,040
Gliricidia sepium	Moyenne	3,51	0,203	1,722	1,617	1,037
	Écart-type*	0,26	0,020	0,580	0,682	0,631

* écart-type de la moyenne de 8 répétitions

Quatre traitements sont comparés selon un dispositif en randomisation totale avec cinq répétitions. Chaque répétition correspond à un lysimètre. Les traitements suivants sont étudiés:

T1 : une culture de maïs recevant une fertilisation N minéral soit, par lysimètre, 395 mg N sous forme de sulfate d'ammonium (s.a) marqué à 1 % d'excès isotopique (E%), soit l'équivalent de 35 kg N ha^{-1}

T2 : une culture de maïs ne recevant qu'une faible fertilisation N pour les besoins de la méthode expérimentale soit, par lysimètre, 79 mg N sous forme de sulfate d'ammonium marqué à 5 % d'excès isotopique (E), soit l'équivalent de 7 kg N ha^{-1};

T3 : une culture de maïs recevant une fumure N sous forme d'émondes de *G. sepium* apportées à raison de 140 g MS par lysimètre correspondant à 2 t ha^{-1} en plus des 79 mg N (7 kg N ha^{-1}) sous forme de sulfate d'ammonium marqué ;

T4 : une culture de maïs où des émondes de *S. siamea* apportées à raison de 140 g MS par lysimètre correspondant à 2 t ha^{-1} en plus de 79 mg N (7 kg N ha^{-1}) sous forme de s.a marqué.

Une fumure minérale P (30 kg P_2O_5 ha^{-1}) et K (30 kg K_2O ha^{-1}) est appliquée, respectivement, sous forme de phosphate supertriple (1.56 g par lysimètre) et de chlorure de potassium (6.80 g par lysimètre) au moment du semis.

L'apport de N sous forme s.a est fait à 15 JAS sous forme liquide.

Les graines de maïs (variété CP 75) sont semées à raison de 5 grains par lysimètre démariés par la suite à 2 grains à 10 JAS.

Les mauvaises herbes sont systématiquement coupées et laissées sur place afin d'éviter toute sortie de N du système sol-plante.
Une irrigation avec de l'eau distillée est assurée "à la demande" de sorte qu'il n'y ait pas de percolation.
Les plantes ont poussé en plein air dans les conditions de saison sèche de Bambey au centre nord du Sénégal en 1995. A 80 JAS, les plantes sont coupées à la surface du sol pour l'évaluation des rendements et la réalisation de différents dosages chimiques.

6.2.2. Expérience au champ

Dans cette expérience, notre préoccupation est de travailler dans les conditions les plus proches possibles du milieu réel. Dans le système agroforestier étudié, du *G. sepium* est planté en haies entre lesquelles du maïs est cultivé. En raison de la non randomisation, deux dispositions ont été prises: (1) d'abord, avant l'implantation de l'essai, en saison sèche, des prélèvements de sol dans les horizons 0-20 cm et 20-40 cm ont été effectués en quadrillant l'ensemble du terrain (quatre bandes de quatre parcelles chacune, chaque parcelle comprenant dix points composites de prélèvement) en vue d'étudier la variabilité de la fertilité du sol (Cissé, 1986); (2) ensuite, pendant la saison des pluies, toutes les parcelles ont été cultivées uniformément en maïs sans application de traitement en vue de leur homogénéisation (3) après cette culture de maïs, les haies de *G. sepium* ont été implantées.
La validité d'un tel dispositif est fondée sur l'estimation géostatistique d'une part de la variabilité spatiale de la texture et de la composition chimique du sol, d'autre part des rendements du maïs en culture d'homogénéisation.

6.2.2.1. Mesure de la variabilité spatiale

La possibilité de pouvoir exploiter un tel dispositif est basée d'une part sur l'appréciation, par l'analyse des variogrammes (Journel, 1975), de la variabilité spatiale de la texture et de la composition chimique du sol, et d'autre part sur le calcul des valeurs moyennes affectées de leur écart-type des rendements du maïs en culture d'homogénéisation.
L'appréciation de la variabilité spatiale de la texture porte sur le taux d'argile+limon, facteur très explicatif du bilan hydrique et minéral dans les sols sableux (Cissé, 1984). En ce qui concerne les caractéristiques chimiques du sol sont considérés la MOS, le N total, la CEC et le pH.
En ce qui concerne les rendements moyens de MS (grains et pailles), ils sont calculés à partir des quatre parcelles de chaque bande.

6.2.2.2. Mise en place de l'essai

Après cette analyse de la variabilité spatiale sur les bandes préalablement quadrillées, trois bandes de culture de quatre parcelles chacune sont mises en place et portent les traitements suivants (annexe 7):

S1 : une culture pure de maïs recevant 100 kg N ha^{-1} sous forme de s.a marqué à 1 % ^{15}N;

S2 : une culture associée de maïs entre deux haies de *G. sepium* où les émondes sont apportées au maïs à raison de 3 t MS ha^{-1} et recevant 20 kg N ha^{-1} sous forme de s.a marqué à 5 % ^{15}N;

S3 :une culture pure de *G. sepium* comprenant quatre haies.

En octobre 1993, les haies de *G. sepium* sont mises en place à partir de plants cultivés en pépinière dans des gaines plastiques remplies de terre (identique de celle du sol de l'essai) pour S2 et S3.

Les bandes S1, S2 et S3 ont une surface de 172,80 m^2 chacune. La bande S2 en culture associée comprend la moitié de sa surface en *G. sepium* et l'autre moitié en maïs.

Chaque bande comprend quatre parcelles ; chaque parcelle des bandes S1 et S2 comprend une microparcelle ^{15}N de 2,16 m^2.

Chaque haie de *G. sepium* de 4,5 m de long comprend deux rangées d'arbres distantes de 1.80 m avec un écartement de 0,50 m entre arbres sur une rangée. Chaque parcelle de maïs de 4,5 m de long est composée de 8 lignes (S2) ou de 16 lignes (S1) aux écartements de 0,60 m entre lignes et de 0,30 m entre poquets sur la ligne. A la récolte, la totalité des lignes de maïs comprises entre les haies de *G. sepium*, à savoir une surface de 21,6 m^2 (4,8 m x 4,5 m) est récoltée.

Les arbres en haies sont coupés en une seule fois (9 mois après la transplantation au champ) sur une hauteur au sol de 0,50 m, avant le semis du maïs. Les émondes (feuilles + brindilles) et les branches sont séparées (les branches dont le diamètre est inférieur à 3 mm sont épandues avec les émondes). La MS totale (sauf racines) produite par les haies est estimée à partir de quatre échantillons d'émondes et de branches séchées à l'étuve à 70 °C pour les premières et à 100 °C pour les secondes. Les émondes fraîches sont épandues et enfouies dans l'horizon 0-5 cm à raison de 6,5 kg MS par parcelle correspondant à 3 t MS ha^{-1}.

Le maïs (variété CP 75: cycle de 75 jours dans la zone) est semé à raison de 3 graines par poquet suivi d'un démariage à 1 plant à 15 JAS. Le semis est effectué en sol humide après l'application des émondes.

Une fumure P (30 kg P_2O_5 ha^{-1}) et K (30 kg K_2O ha^{-1}), sous forme de phosphate supertriple et de chlorure de potassium est apportée au moment du semis. Pour N, des quantités de s.a marqué à ^{15}N de 101,5 g et de 20,5g par microparcelle de 2,16 m^2 correspondant aux doses de 100 kg et de 20 kg ha^{-1} sont apportées sous forme liquide. Sur le reste de la parcelle du s.a non marqué est appliqué pour

avoir les mêmes doses à l'hectare. La récolte du maïs est effectuée en séparant les tiges+feuilles, les grains et les rafles+spathes pour la détermination des rendements de MS et les teneurs en N et ^{15}N.

6.3. RÉSULTATS

6.3.1. Etude de la variabilité pour le contrôle du dispositif

L'analyse géostatistique de la variabilité est faite par la fonction semivariogramme ($\Upsilon(h)$) qui est estimée par la formule suivante (Journel, 1975):

$$\Upsilon(h) = 1/2N_h \sum(Z_i - Z_{i+h})^2$$

où :

Z_i et Z_{i+h} sont les valeurs de la variable Z aux points i et i+h

N_h est le nombre de couples espacés de h

h est la distance entre deux points

On calcule le semivariogramme selon diverses directions (0, 90, 45, 135°, etc.); nous nous sommes limités aux directions 0 et 90°. En général, on observe la croissance de $\Upsilon(h)$ en fonction de h sauf dans le cas où les échantillons sont complètement indépendants où le semivariogramme est alors plat, ce que nous avons observé à l'échelle des mesures.

L'étude des semivariogrammes permet d'étudier la variabilité spatiale des paramètres mesurés à l'échelle de l'expérimentation. Deux considérations limitent la portée de l'étude géostatistique (a) d'une part, la maille d'échantillonnage, respectivement, de 6 m et de 8 m le long des directions 0° et 90°; (b) d'autre part, le faible nombre de points pour l'estimation du semivariogramme un minimum de 30 points serait nécessaire pour estimer une position.

Sur la base de la deuxième considération, on pourrait présumer un "effet pépite" qui désigne toutes les variations d'échelles propres, très inférieures à l'échelle de l'observation faite, qui masquerait alors l'existence d'une variation spatiale (annexe 8).

En ce qui concerne les rendements moyens de MS (grains et pailles), calculés à partir des quatre parcelles de chaque bande, les nuages d'incertitudes entourant les valeurs moyennes (valeurs des écart-types) sont très faibles (tableau 16). L'analyse de ces rendements moyens apporte une validation supplémentaire à la possibilité de comparaison entre les bandes qui vont contenir les systèmes étudiés sans toutefois prétendre à une analyse statistique précise.

Tableau 16 : Variation spatiale du rendement de maïs en culture d'homogénéisation (1993) précédant la mise en place de l'essai de culture en couloirs.

Rendement kg ha^{-1}	Ensemble du terrain n = 12	B1 n = 4	B2 n = 4	B3 n = 4
Grains	759 ± 81	634 ± 84	667 ±76	603 ± 62
Pailles	1400 ± 77	1427 ± 91	1368 ± 53	1393 ± 62
Total	2159 ± 141	2223 ± 171	2076 ± 96	2146 ± 89

B1, B2 et B3 désignent les bandes destinées à abriter, respectivement, la monoculture de maïs, la culture en allées maïs / *G. sepium* et la monoculture de *G. sepium*

n = nombre de parcelles (8.4 m x 4.5 m) récoltées pour chaque bande (B1, B2 et B3)

Les chiffres précédés par± indiquent l'écart-type de la moyenne de 4 répétitions

6.3.2. Matière sèche, teneur et quantité de N total des parties aériennes

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 17 pour l'essai en lysimètres et dans le tableau 18 pour l'essai au champ.

En lysimètres, l'apport d'émondes accroît significativement le rendement par rapport à celui obtenu sur le témoin (T2) sans différences significatives entre *G. sepium* et *S. siamea* ; ce rendement est équivalent à celui obtenu avec le sulfate d'ammonium. La teneur en N ainsi que le N total plante sont accrus sous l'action des émondes sans qu'il y ait un effet du type d'émondes: le N total est de 1547 mg par lysimètre sous le témoin T2, il est presque doublé sous l'action des émondes: 3028 et 3041 mg par lysimètre, respectivement, pour *G. sepium* et *S. siamea* (comparés à 2434 mg pour le sulfate d'ammonium).

Tableau 17: Matière sèche (MS), excès isotopique (E%), N total (N plante), Ndff et CRU de l'engrais, en lysimètres.

Traitements		MS	^{15}N	N plante		Ndff		CRU
		g lys^{-1}	E %	%	g lys^{-1}	%	g lys^{-1}	%
T1 engrais 35 kg N ha^{-1}	S + R	50,2 a	0,3369	0,40	197,8 a	3,72	7,3	5,4
	T + F	131,4 a	0,3406	0,59	816,2 a	6,75	54,5	40,4
	G	88,7 a	0,3295	1,61	1420,5 a	3,18	45,3	33,6
	Total	270,3 a	-	0,88	2434,5b	4,42	107,1 a	79,3
T2 engrais 7 kg N ha^{-1}	S + R	43,4 a	0,3246	0,49	188,5 a	0,65	1,2	4,4
	T + F	91,0 b	0,3411	0,66	565,1 c	0,83	4,6	17,2
	G	50,0 c	0,3280	1,60	795,9 b	0,65	5,1	18,8
	Total	184,4 c	-	0,83	1547,4 c	0,71	10,9 c	40,4
T3 émondes *G. sepium* 2 t ha^{-1} + 7 kg N ha^{-1}	S + R	44,8 a	0,3248	0,67	299,0 a	0,63	1,8	6,7
	T + F	120,2 a	0,3408	0,92	1105,8 a	0,87	9,6	35,5
	G	72,8 b	0,3241	2,23	1622,8 a	0,54	8,8	32,8
	Total	237,8 b	-	1,28	3027,7 a	0,67	20,2 b	75,0
T4 émondes *S. siamea* 2 t ha^{-1} + 7 kg N ha^{-1}	S + R	52,4 a	0,3207	0,52	285,0 a	0,62	1,8	2,2
	T + F	124,2 a	0,3427	0,92	1168,6 a	0,86	10,1	37,2
	G	76,6 b	0,3285	2,16	1567,8 a	0,57	9,2	34,0
	Total	253,2 ab	-	1,21	3041,3 a	0,69	21,1 b	73,5

lys = lysimètre; .S+R = spathes+rafles; T+F = tiges+feuilles; G = graines:
. Quantité de N apportée: 395 mg et 79 mg N par lys, respectivement, pour T1 et (T2, T3 et T3).
. Quantité d'émondes apportées : 140 g M.S par lysimètre pour T3 (*G. sepium)* et T4 (*C. siamea*).
Coefficient de variation (CV) :
M.S : (S+R) = 11.5 %, (T+F) = 10.4 %, (G) = 10.6 %, (Total) = 8.2 % :
N plte : (S+R) = 23.6 %, (T+F) = 13.0 %, (G) = 12.3 %, (Total) = 9.6%:
Ndff : (Total) = 14.2 %;
Les chiffres affectés de la même lettre ne sont pas significativement différents au test de classement de moyennes de Newman-Keuls à p = 0.05

Tableau 18: Matière sèche (MS), excès isotopique (E%), N total (N plante), Ndff et CRU de l'engrais. au champ pendant les années 1994 et 1995.

Systèmes		MS	^{15}N	N plante		Ndff		CRU
		kg ha^{-1}	E %	%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%
1994								
S1	S + R	642	0,2559	0,96	6,2	25,85	1,6	1,6
culture pure de maïs	T + F	2581	0,3138	1,60	41,0	31,70	12,9	12,9
	G	2361	0,2721	2,22	52,3	35,06	16,5	21,9
	Total	5584 ±558	-	1,79	99,6 ±8,3	31,28	31.1 ±2.8	36,5
S2	S + R	589	0,2978	0,73	4,3	5,58	0.2	1,2
culture de maïs en allées	T + F	2570	0,2614	1,18	30,2	5,45	1.6	8,1
	G	1986	0,2861	1,93	38,5	5,84	2.1	11,2
1995	Total	5145 ±427	-	1,42	73,0 ±4,7	5,35	3.9 ±0.2	20,5
S1	S + R	647	0,2089	0,86	5,5	41,31	2.3	2,3
culture pure de maïs	T + F	2772	0,3220	1,32	36,6	32,53	11.9	11,9
	G	2187	0,2804	1,95	42,6	33,43	13.8	14,2
	Total	5606 ±275	-	1,32	84,8 ±3,6	33,10	28.0 ±1.8	28,4
S2	S + R	485	0,2342	0,62	3,08	7,46	0.2	1,1
culture de maïs en allées	T + F	2529	0,3354	1,07	27,1	6,84	1.7	9,3
	G	1760	0,2960	1,85	32,6	7,23	2.2	11,5
	Total	4774 ±113	-	1,32	62,7 ±2,3	6,59	4.1 ±0.5	21,8

S+R = spathes+rafles, T+F = tiges+feuilles, G = graines
.Quantités d'engrais apportées: 100 kg N ha^{-1} (S1) et 20 kg N ha^{-1} (S2).
.Quantité d'émondes apportées : 3 t MS ha^{-1} (S2)
Les chiffres précédés du signe ± indiquent l écart-type de la moyenne

Pour l'essai au champ, à surfaces emblavées égales, (culture associée vs culture pure), l'apport des émondes permet d'obtenir, respectivement, 49 et 42 % en 1994 et 44 et 40 % en 1995, en pourcentage du rendement des parties aériennes et du rendement en grains du traitement S1 ayant reçu 100 kg N ha^{-1} d'engrais (tableau 19).

Tableau 19: Comparaison des rendements de maïs, à surfaces emblavées égales, entre la culture pure de maïs et la culture de maïs en allées.

Année	Rendement de maïs en culture en allées (kg ha^{-1})		Rendement du maïs en culture pure (kg ha^{-1})		% de rendement de maïs en allées par rapport à la culture pure de maïs	
	Pailles	Grains	Pailles	Grains	Pailles	Grains
1994	1579	993	3223	2361	49 %	42 %
1995	1507	880	3419	2187	44 %	40 %
Moyenne	1533	936	3321	2274	46 %	41 %

La prise en compte dans la culture associée maïs-arbre, à la fois de la production de la céréale et de la production de l'arbre, nous permet de calculer l'Indice de Surface Equivalente (ISE) ou "Land Equivalent Ratio" (LER) en anglais. L'ISE est un indice d'évaluation de la culture associée.

6.3.3. Estimation de l'Indice de Surface Equivalente (ISE)

L'ISE est un indice biologique d'utilisation de la terre par les cultures associées (Rao et Coe, 1992); il représente la surface de terre qui serait nécessaire en cultures pures pour obtenir les mêmes

rendements qu'en culture associée (Willey et Osiru, 1972 ; Salez, 1988). Dans l'essai au champ, S1 est une culture pure de maïs, S2 est une association de *G. sepium* et de maïs et S3 est une culture pure de *G. sepium.*

On peut alors calculer un ISE par la relation suivante: ISE = Lg + Lm ,
où :
Lg est le rapport du rendement en "bois + émondes" de *G. sepium* en culture en allées (S2) sur le rendement en "bois + émondes" de *G. sepium* en monoculture de *G. sepium* (S3) ;
Lm est le rapport du rendement "grains + pailles" de maïs en culture en allées (S2) sur le rendement "grains + pailles" de maïs en monoculture maïs (S1).
Les résultats obtenus figurent dans le tableau 20 et concernent les rendements de MS totale (sans les racines). On distingue la culture pure de maïs sans N de celle avec N.

Tableau 20: Rendements MS de *G. sepium* et du maïs et ISE calculé à partir du rendement total (essai au champ ; années 1994 et 1995).

Année	*G. sepium*			Maïs					ISE	
	C.P	C.A	Lg	C.Pa	C.A	C.Ps	Lma	Lms	ISEa	ISEs
	MS totale kg ha^{-1}			MS totale		kg ha^{-1}				
1994	6198 ±349	2729 ±150	0,44	5585 ±558	2573 ±225	-	0,46	-	0,91	-
1995	6121 ±78	2898 ±55	0,47	5606 ±275	2388 ±56	2154	0,43	1,11	0,90	1,58
Moyenne	6159	2814	0,46	5595	2480	-	0,44	-	0,90	-

C.Pa = culture pure avec azote
C.Ps = culture pure sans azote
C.A = culture en allées
MS totale = matière sèche totale: *G.sepium* (émondes+branches), maïs (grains+pailles)
Lg = rendement relatif de *G. sepium*
Lma = rendement relatif de maïs (avec culture pure de maïs avec engrais)
Lms = rendement relatif de maïs (avec culture pure de maïs sans engrais)
ISEa = ISE calculé en prenant en compte le rendement de la culture pure de maïs avec engrais
ISEs = ISE calculé en prenant en compte le rendement de la culture pure de maïs sans engrais

Les chiffres précédés du signe ± indiquent l'écart-type de la moyenne

6.3.3.1. Culture pure de maïs avec N

Le Lm moyen en culture pure avec N est de 0,44 et le Lg moyen est de 0,46 soit un ISE égal à 0,90. **L'efficience biologique de l'utilisation de la terre est presque aussi bonne en système agroforestier sans engrais qu'en culture pure avec une forte dose d'engrais (100 kg N ha^{-1}).**

6.3.3.2. Culture pure de maïs sans N

Sur un essai conduit dans le même site en 1995, le rendement du maïs sans N est de 511 et de 1643 kg ha^{-1}, respectivement, pour les grains et les pailles (chapitre V ; tableau 11). Lm est alors de 1.11 et Lg de 0.47 soit un ISE de 1.58. **Ce résultat montre que l'efficience biologique de l'utilisation de la terre est beaucoup plus importante en système agroforestier (S2) qu'en système de culture traditionnel; on enregistre un accroissement de rendement de 58 % de MS totale par rapport aux cultures pures. Cet avantage est considérable en régions à forte pression démographique comme le Bassin Arachidier du Sénégal, où la terre représente une ressource rare.**

6.3.4. Valeur A, Ndff, Ndfe et Ndfs, CRU

L'emploi de ^{15}N a permis, dans le N total du maïs, de quantifier la part respective de l'engrais (Ndff), des émondes (Ndfe) et du sol (Ndfs). Rappelons que la valeur A est un maillon essentiel dans la chaîne de calcul de Ndff et de Ndfe; mais elle ne mesure pas la taille du compartiment et donne seulement une représentation ; elle est exprimée en équivalent-engrais (tableaux 21 et 22). Les proportions et quantités de Ndff, de Ndfe et de Nfds sont indiquées dans le tableau 23 pour l'essai en lysimètres et dans le tableau 24 pour l'essai au champ. L'objectif principal de l'étude est de mesurer le Ndfe et le C.R.U des émondes. Les C.R.U de l'engrais et des émondes figurent dans le tableau 25. En ce qui concerne le sulfate d'ammonium, on obtient une bonne utilisation de l'engrais en lysimètres avec un C.R.U variant entre 40 et 79 %, valeurs comprises dans la gamme de celles trouvées par Guiraud (1984) en vases de végétation (38 à 70 %). Par contre, le C.R.U de l'engrais est faible au champ, variant entre 21 et 32 %; et conforme aux valeurs habituellement trouvées (25 à 46 %) dans les conditions de culture du maïs au champ à Nioro (Ganry, 1990). Ce C.R.U faible dans les sols sableux tropicaux est souvent lié à une immobilisation de l'azote par les microorganismes dans le sol et à une utilisation prépondérante, par la céréale, de l'azote du sol (Ganry, 1990). La méthode de valeur A utilisée, comme nous l'avons rappelé ci-dessus, permet de quantifier la contribution des différentes sources N : sol, engrais ajouté et émondes apportées à l'alimentation de N de la plante.

En lysimètres, **pour les plantes recevant des émondes, le Ndfe est de 26 % avec *G. sepium* et de 24 % avec *S. siamea*** (tableau 23). Pour calculer le C.R.U des émondes (C.R.Ue), nous nous sommes référés à la partie biodégradable qui représente 80 % de la quantité d'émondes apportées (chapitre V; fig. 14). Le C.R.Ue est de 20.3 % pour *G. sepium et* de 30.6 % pour *S. siamea* (tableau 11).

Au champ, **la contribution de N des émondes de *G. sepium* (Ndfe) varie de 26 % (1995) à 35 % (1994)** (tableau 24). Cette contribution est proche de celle de l'engrais en 1994 (26 vs 31 kg N ha^{-1}) mais nettement inférieure en 1995 (16 vs 28 kg N ha^{-1}). Le C.R.Ue des émondes de *G. sepium* varie selon l'année, il est plus élevé en 1994 avec 30,4 % qu'en 1995 où il n'est que de 19,1 % (tableau 25). En conclusion, nous retiendrons que le C.R.Ue est compris entre 20 et 30 %.

Tableau 21 : Valeurs A du sol (As), du sol+émondes (As+e) et des émondes (Ae) en lysimètres.

Traitements	As	As+e	Ae
	mg lys^{-1}	mg lys^{-1}	mg lys^{-1}
T1 engrais 100 Nkg ha-1	2945±215	-	-
T3 émondes *G; sepium* 2 t MS ha^{-1} + 7 kg N ha^{-1}	-	4030±146	1088±140
T4 émondes *S. senna* 2 t ha^{-1} + 7 kg N ha^{-1}	-	3930±169	987±169

lys = lysimètre

Les chiffres précédés du signe ± indiquent l'écart-type de la moyenne

Tableau 22: Valeurs A du sol (As), du sol+émondes (As+e) et des émondes (Ae) au champ pendant les années 1994 et 1995.

Systèmes	As	As+e	Ae
	kg N ha^{-1}	kg N ha^{-1}	kg N ha^{-1}
1994			
S1 culture pure de maïs	222 ± 15	-	-
S2 culture de maïs en allées	-	356 ± 18	134 ± 18
1995			
S1 culture pure de maïs	204 ± 16	-	-
S2 culture de maïs en allées	-	286 ± 18	81 ± 18

.Quantités d'engrais apportées: 100 kg N ha^{-1} (S1) et 20 kg N ha^{-1} (S2).
.Quantités d'émondes apportées : 3 t MS ha^{-1} (S2)

Les chiffres précédés du signe ± indiquent l' écart-type de la moyenne

Tableau 23: Pourcentage et quantité de N provenant de l'engrais (Ndff), du sol (Ndfs) et des émondes (Ndfe) dans les parties aériennes de la plante en lysimètres.

Traitements	Ndff		Ndfs		Ndfe	
	%	mg lys^{-1}	%	mg lys^{-1}	%	mg lys^{-1}
T1 engrais 100 kg N ha^{-1}	4,42	107 ±10	95,6	2330 ±232	-	-
T3 émondes *G. sepium* 2 t ha^{-1} + 7 kg N ha^{-1}	0,67	20 ±3	72,9	2210 ±271	26,4	798 ±205
T4 émondes *S. senna* 2 t ha^{-1} + 7 kg N ha^{-1}	0,69	21 ±4	75,0	2292 ±385	24,3	728 ±157

. Quantités de N apportées: 395 mg et 79 mg N par lysimètre, respectivement, pour T1 et (T3 et T4).
. Quantités d'émondes apportées : 140 g M.S par lysimètre pour T3 (*G. sepium*) et T4 (*S. siamea*).

Les chiffres précédés du signe ± indiquent l'écart-type de la moyenne

Tableau 24: Pourcentage et quantité de N provenant de l'engrais (Ndff), du sol (Ndfs) et des émondes (Ndfe) dans les parties aériennes de la plante au champ pendant les années 1994 et 1995.

Systèmes	Ndff		Ndfs		Ndfe	
	%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}	%	kg ha^{-1}
1994						
S1 culture pure de maïs	31,3	31,0 ±2,8	68,7	68,5±7,5	-	-
S2 culture de maïs en allées	5,3	3,9 ±0,2	59,5	43,2 ±1,9	35,2	25,9 ±0,6
1995						
S1 culture pure de maïs	33,1	28,0 ±1,8	66,9	56,8 ±5,1	-	-
S2 culture de maïs en allées	6,9	4,1±0,5	67,8	42,5 ±4,7	25,6	16,1±0,5

.Quantités de N apportées : 100 kg N ha^{-1} (S1) et 20 kg N ha^{-1} (S2)
.Quantités d'émondes de *G. sepium* apportées : 3 t MS ha^{-1} (S2)

Les chiffres précédés du signe ± indiquent l'écart-type de la moyenne

Tableau 25: Comparaison du C.R.U de l'engrais et du C.R.U des émondes en lysimètres et au champ

Type d'essai		Engrais	Emondes	
		(s.a)	G. s	S.s
Lysimètres		79,3 %	20,3%	30,6%
Champ	1994	36,5 %	30,4 %	-
	1995	28,4 %	19,1 %	-
	Moy.	29,5 %	24,8 %	

s.a = sulfate d'ammonium ; G.s = *Gliricidia sepium* ; S.s = *Senna siamea*

On remarque que les valeurs du CRU de l'engrais au champ sont conformes à celles trouvées dans la litterature de 21 à 32 % en zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest (Guiraud, 1984; Ganry, 1990) où on enregistre des pertes par lixiviation et par volatilisation.

6.3.5. Comparaison quantitative des émondes et du sulfate d'ammonium (s.a) en termes de produit et en termes d'azote

La valeur A permet également de faire une comparaison quantitative entre le s.a et les émondes en termes de produit et termes de N (Zapata, 1990). En effet, à partir de la valeur A des émondes (Ae) qui mesure les émondes en équivalent-engrais on peut, sur la base de la dose apportée (en N et produit apporté), estimer les équivalences entre les deux produits.

En lysimètres, en termes de produit: 1 mg de s.a équivaut à 16.5 mg MS de *G. sepium* et à 24.7 mg MS de *S. siamea* et en termes de N: 1 mg N de s.a équivaut à 2.7 mg N de *G. sepium* et à 2.5 mg N de *S. siamea*.

Au champ, en termes de produit 1 kg de s.a équivaut à 8.0 kg MS (1994) et 4.8 kg MS (1995) de *G. sepium* soit une moyenne de 6.4 kg MS et en termes de N: 1 kg N de s.a équivaut à 1.3 kg N (1994) et à 0.8 kg N (1995) de *G. sepium.* soit une moyenne de 1.0 kg N. On voit qu'en termes de N, au champ, l'efficacité des émondes est identique à celle du s.a.

6.3.6. Contribution de la fixation de N_2 du G. sepium, via les émondes, à l'alimentation azotée du maïs

Le pourcentage d'azote fixé (Ndfa %) de *G. sepium* est de l'ordre de 25 % à Nioro (Ndiaye et Ganry, 1997 à paraître). Sur la base de cette donnée, on peut estimer la proportion de N_2 fixé contenue dans les émondes et par conséquent sa contribution à la nutrition azotée du maïs (tableau 26).
Cette contribution est assez faible dans le sol de Nioro, elle est de 6.0 % en lysimètres et de 7.5 % au champ. Mais par ailleurs, nous avons également montré (Ndiaye et Ganry, 1997 à paraître) que la fixation de N_2 pouvait atteindre 75 % en présence de souches de *Bradyrhizobium* spécifiques efficientes, dans un environnement plus favorable comme le sud du Sénégal. Dans ces conditions, la contribution de N des émondes de *G. sepium* provenant de la fixation de N_2 atteindrait 20 à 25 % de N total du maïs, ce qui est non négligeable pour la mise en oeuvre d'un système agroforestier durable.

Tableau 26: Contribution de la fixation de N_2, via les émondes de *G. sepium*, à l'alimentation azotée du maïs

a./ Hypothèse d'une faible fixation de N_2 de *G. sepium* (NdfFix = 25 %)

Type d'essai		N total	Ndfe		
			Sol	Fix	Total
Lysimètres		3028 mg N lys^{-1}	19,5 % ou 790 mg N lys^{-1}	6,5 % ou 197 mg N lys^{-1}	26 % ou 987 mg N lys^{-1}
Champ	1994	73 kg N ha^{-1}	26,2 % ou 19,6 kg N ha^{-1}	8,8 % ou 6,4 kg N ha^{-1}	35 % ou 26 kg N ha^{-1}
	1995	63 kg N ha^{-1}	19,5 % ou 11,9 kg N ha^{-1}	6,5 % ou 4,1 kg N ha^{-1}	26 % ou 16 kg N ha^{-1}
	Moyenne	68 kg N ha^{-1}	22,3 % ou 15 kg N ha^{-1}	7,7 % ou 5 kg N ha^{-1}	30 % ou 20 kg N ha^{-1}

b./ Hypothèse d'une forte fixation de N_2 de *G. sepium* (NdfFix = 75%)

Type d'essai		N total	Ndfe		
			Sol	Fix	Total
Lysimètres		3028 mg N $lys.^{-1}$	1,6 % ou 61 mg N $lys.^{-1}$	24,4 % ou 926 mg N $lys.^{-1}$	26 % ou 987 mg N $lys.^{-1}$
Champ	1994	73 kg N ha^{-1}	8,3 % ou 6 kg N ha^{-1}	26,7 % ou 20 kg N ha^{-1}	35 % ou 26 kg N ha^{-1}
	1995	63 kg N ha^{-1}	7 % ou 4 kg N ha^{-1}	19,0 % ou 12 kg N ha^{-1}	26 % ou 16 kg N ha^{-1}
	Moyenne	68 kg N ha^{-1}	6,8 % ou 5 kg N ha^{-1}	23,2 % ou 15 kg N ha^{-1}	30 % ou 20 kg N ha^{-1}

6.3.7. Importance du système racinaire des arbres dans la réussite de l'association arbre-culture

Nous n'avons pas l'intention ici de conduire une étude complète sur le système racinaire et ses multiples fonctions. Nous nous limiterons à son rôle dans le maintien de la fertilité des sols (sens large). A ce titre, les racines ont pour fonction de contribuer au maintien de la matière organique et des propriétés physiques du sol, de prélever les éléments nutritifs des couches profondes du sol et de les restituer par la litière à la surface du sol. Elles ont, en outre, une fonction indirecte de stabilisation des sols et de réduction de la perte d'éléments par érosion, de contrôle de la salinité et de l'acidité. Ces derniers aspects ont été traités en détail par Prinsley (1993) et par Breman et Kessler (1995). En zone semi-aride, nous considérons que le système racinaire de l'arbre joue un rôle prépondérant pour (i) le démarrage de la plantation de l'arbre dans le système agroforestier (ii) la concurrence vis-à-vis de la culture associée (iii) le choix des espèces en haies en vue d'une maîtrise de l'effet de "bordure" (iv) une valorisation du cycle biogéochimique, notamment chez les espèces phréatophytes. L'enrichissement des sols en matière organique par les racines impose un enracinement dense de l'arbre, mais celui-ci serait inévitablement concurrenciel vis à vis de la culture associée. En revanche, en jachère arborée ce rôle peut être de première importance. A cet égard, Harmand (1997, communication personnelle) souligne l'importance des systèmes racinaires des jachères arborées; en effet, cet auteur a mesuré une biomasse racinaire d'environ 30 t ha^{-1} dans le cas de *Acacia polyacantha* situés principalement en surface, soit presque autant que la biomasse ligneuse aérienne.

6.3.7.1. Démarrage de la plantation de l'arbre

En zone semi-aride, l'eau est l'un des principaux facteurs limitants de la croissance des végétaux. Dans ces conditions, la réussite de l'installation des arbres dépend largement de la vitesse et de la profondeur d'enracinement pour la prospection des horizons profonds plus humides.
Dans une expérience que nous avons menée en rhizotrons et mettant en comparaison les systèmes racinaires de *G. sepium* et de *S. siamea* (Ndiaye et Annerose, à paraître) nous montrons que:
(1) la profondeur d'enracinement de *G. sepium* et *S. siamea* est la même au bout de 100 jours mais la vitesse d'enracinement est plus rapide chez *G. sepium*. Cette caractéristique de *G. sepium* revêt une importance toute particulière pour la réussite de l'implantation de l'arbre en zone semi-aride;
(2) le nombre de racines est supérieur dans les horizons 0-20 et 20-40 cm du sol chez *G. sepium*. Cette espèce est donc plus adaptée que *S. siamea* dans les conditions semi-arides où l'eau est un facteur primordial limitant l'installation des arbres; en plus, il a l'avantage de fixer l'azote (N_2), ce que ne fait pas *S. siamea*.

6.3.7.2. Rôle des racines de l'arbre dans la concurrence vis-à-vis de la culture associée

. Profil racinaire de l'arbre

En zone semi aride du Centre-Nord Sénégal, Cazet (1989) montre que les systèmes racinaires d'Acacias locaux (*A.nilotica, A. raddiana*) densément ramifiés (racines traçantes) dans le premier mètre du sol concurrencent fortement les racines des cultures adjacentes d'arachide, de mil ou de niébé, pour l'eau et les éléments nutritifs; au Sénégal, cet auteur montre également que ceci se traduit sur les cultures associées par une diminution des rendements de plus de 50 % jusqu'à une distance de 2,50 m de la ligne d'arbres, contrairement à *F. albida* à racines pivotantes.

. Effet des écartements des haies

Rao et al. (1990) ont observé, en zone semi-aride de l'Inde, une diminution forte (60 à 80 %) de rendements du sorgho et du pois d'angole en "allées étroites" par rapport aux "allées larges" due à une plus forte concurrence pour l'eau exercée par les racines latérales des arbres (Leucaena) en haies, sur les plantes associées.

. Effet de l'âge de l'arbre

La concurrence des racines de l'arbre sur la culture associée s'accroît avec l'âge des arbres en haies au fur et à mesure de leur développement racinaire (Rao et al., 1990).

. Choix des espèces en allées en vue de la maîtrise de la concurrence arbre/ culture

Dans la culture en couloirs, le profil d'enracinements des ligneux doit être pivotant et le moins traçant possible afin de diminuer la compétition avec la culture associée. Gillespie (1989) montre, qu'en plus du facteur "espèce", la densité d'enracinement et la distribution des racines pour une plante donnée varient selon le type de sol le régime d'humidité et le niveau de fertilité du sol; d'après cet auteur, lorsque l'on dispose de ces informations sur la densité et la dynamique d'enracinement des ligneux et des cultures que l'on souhaite associer, il est possible de modéliser la concurrence pour les éléments nutritifs et d'utiliser ces informations dans la conception de systèmes agroforestiers.

En zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest, nous disposons de très peu travaux publiés sur ce sujet; malgré tout, nous fondant sur les résultats de Cazet (1989), nous soulignons le rôle primordial de l'enracinement des arbres en cultures associées. Ce sont effectivement des stratégies de développement racinaire variables selon les espèces qui permettent souvent d'expliquer, au moins partiellement, la concurrence exercée par les arbres sur les cultures associées. En revanche, en jachère

arborée, le développement racinaire en surface est un facteur favorable d'enrichissement du sol en matière organique

6.4. DISCUSSION - CONCLUSION

L'étude comparative des bandes en culture et en cultures associées a nécessité une analyse géostatistique de la variabilité.

Les semivariogrammes ne révèlent aucune structure spatiale dans les variables analysées. Cela indique que, dans les conditions de l'expérience, les paramètres étudiés ont une distribution aléatoire (semivariogrammes plats). Au regard de la bande d'incertitudes (écart-types), l'analyse des rendements moyens obtenus en culture d'homogénéisation apporte une validation supplémentaire du caractère aléatoire de la distribution des variables considérées et suggère la possibilité de comparaison entre les bandes qui vont abriter les systèmes étudiés sans toutefois prétendre à une analyse statistique conventionnelle.

Les émondes ont un effet marqué comparable à celui de la fumure minérale, sur les rendements et le N total du maïs, qui s'explique du moins en partie, par l'accroissement de l'absorption de N par le maïs à partir du pool N du sol enrichi par les émondes apportées; on n'enregistre pas de différences entre *G. sepium* et *S. sia*mea, sur ces critères, en lysimètres. C'est la raison pour laquelle au champ, nous avons choisi *G. sepium* qui, de plus, est une espèce fixatrice de N_2 contrairement à *S. siamea* (Allen et Allen, 1981). Ces effets sur le rendement et sur le N total plante sont cohérents avec les propriétés nutritionnelles de ces émondes déjà mises en évidence dans nos travaux (chapitre IV et V).

Au champ, le Ndfs de la culture pure de maïs est de 68 %; dans le système agroforestier, le Ndfs est 63 %. Si l'on se base sur un Ndfa de 25 % dans le *G. Sepium* dans l'environnement du Centre-Sénégal (Ndiaye et Ganry, 1997 à paraître), le Ndfa dans le maïs, par voie de conséquence, est de 8 % ; il pourrait atteindre 25 % dans le maïs si le Ndfa du *G. sepium* atteignait la valeur de 75 % enregistrée dans le Sud-Sénégal. La valeur de Ndfa de 25 % est comprise dans la gamme de valeurs trouvées par de nombreux auteurs notamment Kang et al. (1984), Kang et Duguma (1985), Mulongoy et al. (1992). Ils ont montré que d'une part la fixation de N_2 par l'arbre pouvait contribuer pour 30 à 45 % des besoins azotés de la légumineuse et que 10 à 30 %, via les émondes, étaient utilisés par la culture associée et que, d'autre part, ce bénéfice augmentait progressivement en raison de l'accroissement de la productivité et de l' effet cumulatif des émondes.

Enfin, le système agroforestier avec un ISE de 1.58 est un système qui présente une efficience biologique d'utilisation de la terre plus importante que celle de la culture individuelle. Cet avantage est capital dans les zones où la terre est une ressource rare comme le Bassin Arachidier du Sénégal.

En cours de saison des pluies, le système agroforestier offrirait également une possibilité de culture de niébé dérobé entre les haies de *G. sepium*, ce qui serait une source de revenu supplémentaire pour l'agriculteur. Cette culture, avec la production de bois, compenserait la "perte" éventuelle de la terre cultivable.

DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE

DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE

L'agroforesterie est un ensemble de techniques qui s'appliquent dans des situations en pleine évolution (pression démographique, rareté des terres, érosion et migration); le manque de références techniques adaptées aux nouvelles situations est souvent un handicap pour les projets de développement. C'est précisément le cas de la région Centre Sénégal où l'espace est saturée, la pression démographique forte (80 hab./km^2) où peu de travaux publiés sur la problématique que nous étudions sont disponibles (Ducousso, 1991). Des travaux relatifs aux pratiques forestières sont cependant en cours au Sénégal (voir annexe 9). Ces travaux privilégient les légumineuses arbustives qui sont de plus en plus utilisées dans les systèmes de production sous les tropiques. Malheureusement, l'utilisation des légumineuses en agroforesterie, en zone semi-aride, est souvent limitée par une fixation de N_2 déficiente (Habish, 1970; Langkamp et al., 1982; Sprent, 1986; Dommergues, 1987; Sprent et Sutherland, 1990; Ganry et Dommergues, 1995).

La fixation biologique de N_2: son importance et sa représentation spatiale à l'échelle du pays

Nous avons quantifié le processus de fixation de N_2 et tenté d'en connaître le déterminisme et sa représentation spatiale. Notre hypothèse de travail se rapporte aux hypothèses N° 4 (fixation de N_2) de Young (1989 b). Nous avons fait un diagnostic de la fixation de N_2 par des légumineuses arbustives selon un "transect" nord-sud (de la zone soudano-sahélienne à la zone sub-guinéenne) du Sénégal. L'approche spatiale utilisée dans cette étude met en évidence un seuil pluviométrique (800 mm < isohyète > 1000 mm) au delà duquel, la fixation réelle de N_2 (FRN) est élevée et, en deçà duquel, elle est faible. Toutefois, le nombre réduit de sites par zone écologique, limite la portée de l'extrapolation du résultat de FRN à l'ensemble de la zone écologique. La faible fixation de N_2 observée en zone soudano-sahélienne du Sénégal (à Bambey et Nioro) est corroborée par les résultats obtenus en zone semi-aride d'Australie sur des Acacias montrant une très faible fixation de N_2, inférieure à 2 kg N ha^{-1} an^{-1} (Roughley, 1987). Des résultats similaires ont été rapportés par Breman et Kessler (1995) sur diverses légumineuses arbustives en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique avec des niveaux de fixation de N_2 inférieurs à 1 kg N ha^{-1} an^{-1} qui seraient explicables, d'après ces auteurs, par la carence en phosphore et la longue saison sèche dans les régions soudano-sahéliennes. Dans notre cas, nous avons montré, au cours d'une expérience en milieu contrôlé sur du sol de Nioro, que la contrainte était liée à l'absence dans le sol de *Bradyrhizobium* natifs et efficients. Deux hypothèses sont alors émises pour expliquer les faibles FRN mesurées dans ce sol de Nioro :

i) partant du fait déjà vérifié expérimentalement (Ducousso et al., 1995) qu'une souche native ne peut s'exprimer que suite à des cultures répétées de la plante hôte sur une longue période dans la zone considérée, c'est le nombre faible d'arbres fixateurs de N_2 dans la zone qui expliquerait l'absence de *Bradyrhizobium* spécifiques et ii) c'est l'existence d'une interaction négative entre les contraintes pédoclimatiques et la survie du *Bradyrhizobuim* dans le sol qui expliquerait l'absence de *Bradyrhizobium*. De nombreuses études ont été effectuées sur la fixation de N_2 par les légumineuses arbustives en zones tropicales, notamment en Afrique par l'IITA (Mulongoy, 1992; Kang et Wilson, 1987; Sanginga et al., 1987) et par l'ICRAF (ICRAF, 1991), en Indonésie (Peggin et Parera, 1985), aux Philippines (Macdicken, 1990), en Asie (MacDicken et Raintree, 1991) et en Australie (Xu et al., 1993 a). De telles études sont rares en zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest (Ducousso, 1991). La plupart des ces études sont difficilement extrapolables parce que spécifiques à un environnement donné et sans objectif de représentation spatiale (Young, 1986). L'approche spatiale que nous avons développée pour la fixation de N_2 *in situ* constitue une phase préalable importante dans l'élaboration de modèles prévisionnels d'évaluation, d'extrapolation et de mise en oeuvre de systèmes agroforestiers durables. Cela étant, nous sommes ensuite consacrés à la deuxième phase, l'étape ultérieure consiste en l'identification et la mesure d'un certain nombre de paramètres pour une amélioration de la culture associée arbre / culture qui permette de tirer profit de l'un et de l'autre..

Biodégradation des émondes et recherche de la synchronisation entre l'offre en N des émondes et la demande en N par le maïs

Les mécanismes par lesquels l'arbre, via les émondes, influence le rendement de la culture, nécessite la connaissance des paramètres de vitesse et d'intensité de biodégradation des émondes. L'efficacité des émondes comme fertilisant repose sur la synchronisation entre l'offre en éléments nutritifs libérés (notamment N) et la demande en ces mêmes éléments par la céréale. A cet égard, la caractérisation des émondes a fait l'objet de nombreuses études, notamment celle portant sur le rapport polyphénols/N pour lequel un seuil de 0.5, au delà duquel la décomposition est inhibée, a été déterminé par Palm et Sanchez (1991). D'autres auteurs se sont attachés à montrer le rôle important joué par les termites dans le processus de décomposition des litières, par exemple en zone de savanes d'Afrique au sud du Sahara (Lavelle et al., 1990) ou dans l'Ouest du Texas (Bodine et Ueckert, 1975). Il importe cependant d'ajouter que l'efficacité maximum des litières ou des émondes est obtenue quand l'activité de la biomasse microbienne est suffisamment élevée pour prendre le relais de l'activité de la macrofaune (Lavelle, 1987).

Nos travaux ont permis principalement de déterminer deux caractéristiques essentielles de l'offre en N des émondes de *G. sepium* et de *Senna siamea* au laboratoire, en lysimètres et au champ (au champ pour la première espèce seulement). La première est une caractéristique de capacité: le pourcentage de N minéralisé; la seconde est une caractéristique de cinétique: la demi-vie. En ce qui concerne la capacité, la quantité de N libérée par les émondes de *G. sepium* est plus importante que celle de *S. siamea*, les résultats en lysimètres confirmant les résultats au laboratoire: elle est, respectivement pour *G. sepium* et *S. siamea*, de 13 et de 4 mg N kg^{-1} d'émondes au laboratoire, de 3 et de 2 mg N kg^{-1} d'émondes en lysimètres; elle est de 40 kg N t^{-1} au champ pour *G. sepium*. En ce qui concerne la cinétique, la demi-vie est de 12 jours au laboratoire et de 20 jours au champ pour *G. sepium* avec des taux maxima de biodégradation de la matière initiale de 70 % et 80 %. On voit que les deux paramètres mesurés *in vitro* sont validés par des mesures *in situ*, ce qui atteste de leur pertinence en tant que paramètres de capacité et de cinétique. Pour en faire des indicateurs pertinents qui auraient l'avantage d'être fondés sur des mesures simples, reproductibles et rapides car réalisables en laboratoire, il conviendrait par la suite de s'assurer de leur domaine de validité en testant *in situ* plusieurs espèces.

La connaissance des deux paramètres (demi-vie et % N minéralisé) que nous avons étudiés et mesurés permet d'ajuster l'offre en éléments nutritifs, notamment N, aux besoins nutritionnels des cultures pour atteindre la synchronie. Cette recherche de la synchronie est une des hypothèses fondamentales du programme sur la biologie et la fertilité des sols tropicaux alors appelée "hypothèse SYNCH" (Swift, 1987; Woomer et Ingram, 1990). Plusieurs méthodes, revues par Young (1995), ont été utilisées pour arriver à la synchronisation entre l'offre en nutriments par les émondes (ou litières) et la demande des plantes vivrières; il s'agit: (i) de la sélection d'espèces végétales à différents taux de décomposition d'émondes (ii) du choix des dates d'émondages (iii) du mode d'apport des émondes (en surface ou enfouies). Dans la culture en couloirs, la période d'émondage est souvent déterminée par la nécessité de réduire l'ombrage sur les jeunes cultures.

En zone tropicale humide, on dispose d'une marge de manoeuvre assez grande dans le choix des dates d'émondage et de semis pour synchroniser la libération d'éléments nutritifs avec le besoin des plantes. En zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest où la pluviométrie est un facteur déterminant de la production agricole, cette marge de manoeuvre est beaucoup plus faible; il nous est alors apparu nécessaire d'effectuer un raisonnement du choix des dates optimales d'émondage des haies et de semis de la céréale. Par ce raisonnement, on tente d'aboutir à un modèle d'optimisation permettant d'assurer la synchronisation entre l'offre en N des émondes de *G. sepium* et la demande en N du maïs afin d'atteindre le rendement "espéré" basé sur la pluviométrie probable et le niveau d'intensification, tel que défini par Cortier et al. (1988) et Forest et Clopes (1994). Cette tentative de modélisation prend en compte (a) les indicateurs de capacité (pourcentage de N biodégradable) et de cinétique (demi-vie)

relatifs aux émondes (b) les séries pluviométriques sur une longue période :45 ans par exemple (c) les caractéristiques de la variété de céréale (d) les caractéristiques du sol. Ce modèle permet l''extrapolation; de plus, il peut s'intégrer à un modèle plus large d'aide à la décision. C'est ainsi qu'à Nioro, pour une réserve utile en eau de 140 mm et pour une variété de maïs à cycle de 75 jours, la période optimale de semis va du 25 juin au 10 août; la date d'émondage doit intervenir 20 jours après le semis du maïs au cours de cette période.

Contribution des émondes à la nutrition azotée du maïs

Dans la culture en allées, les émondes sont appliquées à la culture céréalière. Dès lors, il devient intéressant de déterminer la contribution des éléments nutritifs, particulièrement l'azote, provenant de la fixation de N_2, libérés par ces émondes dans la nutrition de la céréale.

Avant d'entreprendre toute expérience de choix ou de criblage de ligneux sur la fixation de N_2, des renseignements fort utiles peuvent être trouvés dans la littérature. Notamment, on dispose de la "base de données" de la NFTA: Nitrogen-Fixing Tree Association (Halliday, 1984) et de l'inventaire de l'ICRAF sur les arbres et arbustes à usages multiples (ICRAF, 1991). L'une et l'autre de ces sources permettent de faire des recherches selon les critères de zones climatique, de précipitations, de températures, d'altitude, de contraintes dues au sol, de phénologie et d'utilisations. On y trouve, par exemple, que grâce au marquage avec ^{15}N les proportions de N des émondes dérivant de la fixation de N_2 (Ndfa) ont été évaluées à 35-40 % chez *Leucaena* à Ibadan (Nigéria) et à 60 % chez *Prosopis glandulosa* en Californie (Sanginga et al., 1987; Virginia, 1986). Nos résultats montrent que la part du N total de la céréale dérivé de N des émondes (Ndfe) est de 26 % pour *G. sepium* et de 24 % pour *S. siamea* en lysimètres, résultats très proches de ceux obtenus au champ pour *G. sepium* (30 %). La part du N total de la céréale dérivée de la FRN (Ndfa) du G. *sepium* dans la zone écologique considérée a été également mesurée; elle est très faible à Nioro en zone soudano-sahélienne, de l'ordre de 7.5 %, résultat corroboré par celui rapporté en Australie par Catchpoole et Blair (1990) qui ont montré que seulement 7.6 % de de la fixation de N_2 par *Leucaena leucocephala* était transferts au tapis herbacé. En revanche, si l'on pouvait faire accroître la FRN de Nioro (zone soudano-sahélienne) au niveau de celle de Djibélor (zone sub-guinéenne), la part de N total du maïs cultivé à Nioro provenant de cette fixation de N_2 serait de 25% au lieu de 7,5 %. Ce Ndfa mesuré dans la céréale, rend compte du rôle de la FRN arbre dans la durabilité du système agroforestier à base de céréale. Dans le système de culture en allées, la production d'émondes suppose qu'une partie des emblavures soit réservée à la culture de l'arbre, ce qui représente pour l'agriculteur une "perte" de surface cultivable et de ce fait peut être perçu comme un handicap. Cependant la compensation qu'il en tire, en plus de l'économie d'engrais azoté réalisée, sont la production de bois et la possibilité de cultiver

une légumineuse (niébé par exemple) en dérobée dans les interlignes des arbres après émondage.
Le système agroforestier dans la zone centre sud Sénégal présente un ISE (Indice de Surface Equivalente) de 1.58, attestant de la performance du système par rapport à la culture pure. Cette "perte" de surface cultivable en céréale est donc compensée par une plus grande productivité de la terre en céréale (grains et pailles) et en ligneux (émondes et bois).

En conclusion, nous dirons que l'implantation de l'arbre en milieu paysan malgré tous les avantages agro-économiques et écologiques que nous venons de montrer, pour réussir, doit être guidée par une stratégie d'intervention qui doit prendre en compte d'une part la variabilité du milieu (sol, végétation et climat) et d'autre part les objectifs des agriculteurs, leurs moyens et les contraintes socio-économiques dont la pression foncière.

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES

A partir de ces résultats, nous pensons qu'il est nécessaire de développer différents axes de recherches pour améliorer la connaissance du fonctionnement et la gestion du système de culture en allées en zone tropicale sèche de l'Afrique de l'Ouest. Nous devons ainsi approfondir nos connaissances sur l'association culture vivrière - légumineuse arbustive, et en particulier sur les conditions socio-économiques de la mise en oeuvre de cette association.

1. Meilleure connaissance du couple culture-légumineuse arbustive

1.1 Le diagnostic de la fixation de N_2, que nous avons réalisé par approche spatiale, constitue une étape préalable à l'élaboration de modèles prévisionnels d'évaluation, d'extrapolation et de mise en oeuvre de systèmes agroforestiers durables. Ce diagnostic gagnerait à être complété par des études sur :

. les effets des facteurs environnementaux (sécheresse, acidité, salinité) sur la fixation de N_2 de l'arbre,

. les cycles de nodulation et de fixation dans des conditions d'alternance de saison des pluies et saison sèche,

. la spécificité des légumineuses vis-à-vis des souches natives de *Bradyrhizobium*; dans l'espoir que, parmi ces souches, plusieurs d'entre elles puissent s'associer efficacement avec les légumineuses,

. la fixation de N_2 et la photosynthèse étant intimement liées, il conviendrait d'étudier l'influence de l'émondage (période, méthode et hauteur de coupe) sur la fixation de N_2.

1.2. Dans le système agroforestier étudié, un accent doit être mis sur la connaissance de la dynamique de production de biomasse foliaire de l'arbre en vue d'une meilleure maîtrise de la gestion des émondes et du fourrage pouvant faciliter l'intégration agroforesterie-élevage

1.3. Le rôle de la macro et de la mésofaune (termites et vers de terre) devrait être mieux précisé dans le processus de biodégradation des émondes en zone tropicale sèche.

1.4. L'immobilisation de l'azote des émondes dans le sol, sous forme organique, doit être prise en compte.

2. Meilleure connaissance de la perception et des attentes du paysannat

2.1. Rôle social de l'arbre

La perception et les actions à l'égard de l'arbre dans les systèmes de production au Sénégal étaient régies par des lois coutumières relatives à la production fruitière, fourragère et ligneuse qui donnaient le droit d'usage à la personne qui assurait cette production (PRECOBA, 1982). Par contre, la législation actuelle contrôle l'exploitation de cette production qui échappe aux personnes ayant droit de culture sur le terrain. Des mesures doivent donc être prises par les autorités compétentes pour concilier les exigences d'une protection adéquate du patrimoine forestier et les besoins du producteur et du consommateur en vue de favoriser le développement des systèmes agroforestiers.

2.2. Faisabilité du système de culture en allées

La culture céréalière en allées présente un rendement plus élevé que celui de la monoculture sans engrais azoté. Elle présente, toutefois, un certain nombre de contraintes: la mauvaise germination des semences d'arbres lors du semis direct, le pâturage incontrôlé par le bétail ainsi que les besoins en main d'oeuvre pour l'établissement et l'élagage des haies. Les coûts d'investissement et de fonctionnement (essentiellement en main d'oeuvre) nécessaires à la mise en oeuvre et au suivi du système agroforestier doivent être évalués par rapport aux gains induits par l'amélioration de la fertilité du sol et sa protection contre l'érosion.

2.3. L'arbre et le problème du bois-energie

Le fait que les déjections animales soient utilisées comme combustible en milieu rural est un indicateur de la rareté du bois de chauffe. La prise en compte de la production de bois revêt une importance réelle dans l'évaluation du système agroforestier.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Adegbehin, J.O. et A.B.I. Igboanugo. 1990 Agroforestry practices in Nigeria. Agroforestry Systems 10: 1-22.

AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique). 1971. Nitrogen-15 in soil-plant studies. Panel Proceeding Series. STI / PUB / 278. Vienna, Austria

Allard, J.L., Y. Berthaud, J.J. Drevon, O. Seze et F. Ganry. 1983. Ressources en résidus de récolte et potentialité pour le biogaz au Sénégal. L'Agronomie Tropicale 38 (3): 213-221.

Allen, E.K. et O. Allen. 1981. The nodulation profile of the genus *Cassia*, pp. 113-122, in P.S. Nutman, (ed.) Symbiotic Nitrogen Fixation in plants, International Biology Programme N° 7, Cambridge University Press, Cambridge.

Amarger, N., A. Mariotti, F. Mariotti, J.C. Durr, C. Bourguignon et B. Lagacherie. 1979. Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybean using variations in ^{15}N natural abundance. Plant and Soil 52: 269-280.

Anonyme. 1986. Dossier Sénégal: un nouveau plan quadriennal pour une nouvelle politique agricole. Afrique Agriculture 125: 20-36.

Badiane, A.N. 1993. Le statut organique d'un sol sableux de la zone Centre-Nord du Sénégal. Thèse de Docteur, INPL, ENSAIA, Nancy, 200 p.

Bardin, R., A.M. Domenach et A. Chalamet. 1977. Rapports isotopiques naturels de l'azote. II. Application à la mesure de la fixation symbiotique de l'azote in situ. Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol 14: 395-402.

Baumer, M. 1994. Forêts-parcs ou parcs arborés? Bois et Forêts des Tropiques 240: 53-66.

Beaux, M.F., H. Gouet, J.P. Gouet, P. Morleghem, G. Philippeau, J. Tranchefort et M. Verneau. 1988. Manuel d'utilisation STAT-ITCF Version N°4, Institut Technique des Ceréales et des Fourrages (ITCF), Services des Etudes Statistiques, Paris.

Berg, B. et C. McClaugherry. 1987. Nitrogen release from litter in relation to the desappearance of lignin. Biogeochemistry 4 : 219-224 .

Birch, H.F. 1964 . Mineralization of plant nitrogen following aternate wet and dry conditions. Plant and Soil 20 : 43-49 .

Blondel, D. 1971. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (Dior) au Sénégal. Agronomie Tropicale 26: 1303-1333.

Bodine, M.C. et D.N. Ueckert. 1975. Effect of desert termites on herbage and litter in a shortgrass ecosystem in west Texas. Journal of Range Manage 28: 353-358.

Bowen, G.D., N. Sanginga et S.K.A. Danso. 1990. Biological nitrogen fixation in Agroforestry-an overview, pp. 170-175, in Proceedings of 14th International Congress of Soil Science Vol. N° 3, International Institute of Agroenvironmental Sciences, Kyoto, Japan.

Breman, H. et J.J. Kessler. 1995. Woody plants in agro-ecosystems of semi-arid regions, Advanced Series in Agricultural Sciences 23, Springer-Verlag Berlin, Hudelberg, Germany, 335 p.

Buck, M.G. 1986 . Concepts of resource sharing in agroforestry systems. Agoforestry Systems 4: 191-203 .

Budelman, A. 1988. The Decomposition of the leaf mulches of *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium* and *Flemingia macrophylla* under humid tropical conditions. Agroforestry Systems 7: 33-45.

Catchpoole, D.W. et G. Blair. 1990. Forage tree legumes. II. Investigation of nitrogen transfert to an associated grass using split-root technique. Australian Journal of Agricultural Research 41: 531-537.

Cazet, M. 1989. Les plantations linéaires denses sur les sols sableux dégradés de la zone Centre-Nord du Sénégal. Comportement et effets sur les cultures adjacentes de quelques espèces locales et introduites. Bois et Forêts des Tropiques 222: 27-37.

Charreau, C. et R. Nicou. 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 IRAT N° 23, Paris.

Charreau, C. et P. Vidal. 1965. Influence de l'*A cacia albida* Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils *Pennisetum* au Sénégal. L'Agronomie Tropicale 20 (6-7): 600-626.

Cissé, L. 1984. Estimation des pertes moyennes en eau et en éléments fertilisants dans les systèmes de cultures arachide-mil de la zone soudano-sahélienne du Sénégal. Réunion de synthèse de la Division Conjointe FAO / AIEA sur "l'emploi des radioisotopes et des rayonnements dans les études pour une utilisation rationnelle de l'eau et des engrais dans les zones semi-arides", tenue à Vienne du 6 au 11 Février 1984, Doc. Ronéo., ISRA.

Cissé, L. 1986. Etude des effets de la 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, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, Nancy, France.

Cobbina, J., B.T. Kang et A.N. Atta-Krah. 1989. Effect of soil fertility on early growth of Leucaena and Gliricidia in alley farms. Agroforestry Systems 8: 157-164.

Combe, J. 1982. Agroforestry techniques in tropical countries: potential and limitations. Agroforestry Systems 1: 189-204.

COMIFER (Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée). 1987. Glossaire agronomique de l'azote. Termes et symboles utilisés, Groupe Azote, Paris. 14 p.

Cortier, R., G. Pocthier et J. Imbernon. 1988. Le maïs au Sénégal. Effets des techniques culturales et des conditions hydriques en cultures pluviales. L'Agronomie Tropicale 43: 25-80.

Dabin, B. 1967. Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux., pp. 99-115, in Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Vol. 1, 19-25 Novembre 1967, Tananarive, Madagascar.

Dancette, C. et M. Niang. 1979. Rôles de l'arbre et son intégration dans les systèmes agraires du Nord Sénégal. Note rédigée pour le "Séminaire CRDI sur le rôle de l'arbre au Sahel", 5-10 novembre 1979, ISRA, CNRA, Bambey, Sénégal.

Dancette, C. 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. L'Agronomie Tropicale 38: 281-294.

Depommier, D. 1996. Production fruitière et devenir des semences de *Faidherbia albida.* La part des insectes spermatophages et du bétail dans la régénération de l'espèce, pp. 9-22, in Les parcs à *Faidherbia albida.* Cahiers Scientifiques N° 12, CIRAD-Forêt, Centre International de Baillarguet, Montpellier, France.

Domenach, A. M. et F. Kurdali. 1989. Influence des réserves azotées sur la formation des feuilles d'*Alnus glutinosa* et ses conséquences dans l'estimation de la fixation d'azote. Canadian Journal of Botany 67: 865-871.

Domenach, A.M., F. Kurdali et R. Bardin. 1989. Estimation of symbiotic dinitrogen fixation in alder by method based on natural ^{15}N abundance. Plant and Soil 118: 51-59.

Domenach, A.M., D. Snoeck, N. Zakra, H. Beaupied et A. Moiroud. 1997. Impact des arbres fixateurs d'azote sur le fonctionnement des cultures associées en sylviculture. Agronomie Africaine (sous presse).

Dommergues, Y.R. 1987. The role of biological nitrogen fixation in agroforestry, pp. 245-271, in H.A. Steppler and P.K.R. Nair (eds.) Agroforestry a decade of development, ICRAF, Nairobi

Dommergues, Y. 1996. Les arbres fixateurs d'azote dans l'aménagement des écosystèmes méditerranéens et tropicaux. (in press).

Ducousso, M. 1991. Importance des symbioses racinaires pour l'utilisation des Acacias d'Afrique de l'Ouest. CIRAD / ISRA, Dakar, 205 p.

Ducousso, M., B. Sougoufara, N. Dupuy et B. Dreyfus. 1995. Rôle de deux acacias (*Acacia mangium* et *Acacia albida*) dans le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols en Basse Casamance. Rapport final du projet Agroforesterie III N° 91 L 0685, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, France.

Duguma, B., B.T. Kang et D.U.U. Okali. 1990. Effect of pruning intensities of tree woody leguminous species grown in alley cropping with maize and cowpea on an alfisol. Agroforestry Systems 6: 15-35.

Duhoux, E. et Y.R. Dommergues. 1985. The use of nitrogen fixing trees in forest and soil restoration in the tropics, pp. 384-400, in H.S., Sali et S.O. Keya (eds.) Biological Nitrogen Fixation in Africa. Proceedings of the first Conference of African Association for Biological Nitrogen Fixation, 23-27 July, Nairobi, Kenya.

Dupuy, N.C. et B.L. Dreyfus. 1992. *Bradyrhizobium* populations occur in deep soil under leguminous tree *Acacia albida.* Applied and Environmental Microbiology 58: 2415-2419.

Ezcurra, E. et J. Becerra. 1987. Experimental decomposition of litter from the Tamaulipan Cloud Forest : a comparison of four simple models . Biotropica 19: 290-296 .

FAO. 1984. Change in shifting cultivation in Africa. Forestry paper 50. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 59 p.

Felker, P. 1986. Tree plantings in semi-arid regions. Elsevier, New York.

Forest, F. et A. Clopes. 1991. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide de modèle de bilan hydrique, pp. 1-3, in F. Reyniers et L. Noteya (eds.) Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques pour le système de culture, John Libbey Eurotest, Paris.

Fox, R.H., R.J.K. Myers et I. Vallis. 1990. The nitrogen mineralisation rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin and nitrogen contents. Plant and Soil 129: 251-259.

Frankenberger, W.T. et H.M. Abdemagid. 1985. Kinetic parameters of nitrogen mineralisation rates of leguminous crops incorporated into soil. Plant and Soil 87: 257-271 .

Fried, M. et L.A. Dean. 1952. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. Soil Science 73: 263-274.

Fried, M. et H. Broeshart. 1975. An independent measurement of the amount of nitrogen fixed by a legume crop. Plant and Soil 43: 707-711.

Fried, M., S.K.A. Danso et F. Zapata. 1983. The methodology of measurement of N_2 fixation by non-legumes as referred from field experiments with legumes. Canadian Journal of Microbiology 29: 1053-1062.

Ganry, F. 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat d'etat, Université de Nancy 1, Nancy, France.

Ganry, F. et Y.R. Dommergues. 1995. Arbres fixateurs d'azote: champ ouvert pour la recherche. Agriculture et Développement 7: 38-54.

Gastellu, J.M. 1981. L'égalitarisme économique des Serers du Sénégal. Travaux et Documents ORSTOM N° 128, 808 p., ORSTOM, Paris.

Ghuman, B.S. et R. Lal. 1990. Nutrient addition into soil by leaves of *Cassia siamea* and *Gliricidia sepium* grown on an ultisol in Southern Nigeria. Agroforestry Systems 10: 131-133.

Gigou, J. 1995 La fertilité entre forêt et savane en Afrique de l'Ouest, pp: 69-88, in F. Ganry et B. Campbell (ed.) Actes du Seminaire SCOPE de Dakar, "Gestion durable des Terres en zone semi-aride et sub-humide de l'Afrique", CIRAD, Montpellier, France.

Gillespie, A.R. 1989. Modelling nutrient flux interspecies root competition in agroforestry interplantings. Agroforestry Systems 8: 257-265.

Gueye, F. et F. Ganry. 1983. Compostage des pailles de céréales et essai de valorisation agronomique des phosphates naturels au Sénégal par le moyen du compostage. Programme IFS, Bambey, CNRA, 19 p.

Guiraud, G. 1984. Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux des systèmes sol-plante. Thèse de Docteur d'Etat, Université P etM Curie, Paris VI, 315 p.

Habish, H.A. 1970. Effect of certain soil conditions on nodulation of *Acacia* spp. Plant and Soil 33: 1-6.

Halliday, J. 1984. Register of nodulation reports for leguminous trees and other arboreal genera with nitrogen-fixing trees. Nitrogen-Fixing Tree Association Research Report 4: 38-45.

Hamon, R. 1967. Modalités pratiques de fabrication de fumier. Rendements obtenus. Applications possibles en milieu rural sénégalais, pp. 1790-1802, in Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, 19-20 mai, Tananarive, Madagascar.

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). L'Agronomie Tropicale 27: 592-607.

Hansen, A.P. et J.S. Pate. 1987. Evaluation of the ^{15}N natural abundance method and xylem sap analysis for assessing N_2 fixation of understorey legumes in Jarrah (*Eucalyptus arginata* (Donn ex Sm.) forest in South West. Australian Journal of Experimental Botany 38: 1446 -1458.

Harmand, J.M. 1989. Résultats des essais sylvicoles des stations du Nord Cameroun, mesures de 1988-1989. Rapport IRA-CRF, Cameroun.

Haynes, R.J. 1986. The decomposition process : mineralization, immobilization, humus formation and degradation, pp. 52-126, in R.J. Haynes (ed.) Mineral nitrogen in the plant-soil system, Academic Press, Oxford.

Hébert, J. 1971. Théorie de la fumure azotée. Cycle supérieur d'agronomie à l'I.N.A., l'azote en agriculture. p 104-119.

Henin, S., et M. Dupuis. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. Annales Agronomiques 1: 16-27.

ICRAF (International Council for Research in Agroforestry). 1991. Multipurpose tree species database. Nairobi, Kenya, 40 p.

ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles). 1992. Rapport Technique, Direction de Recherches sur les Productions Forestières, 58 p.

Jama, B., A. Gehutan et D.N. Ngugi. 1990. Shading effects of alley cropped *Leucaena leucocephala* on weed biomass and maize yield at Mtwapa, Coast Province, Kenya. Agroforestry Systems 13: 1-11.

Jama, M.S.T. et A. Gehutan. 1991. Intercropping *A cacia albida* with maize (*Zea mays*) and green gram (*Phaseolus aureus*) at Mbwapa, Coast Province, Kenya. Agroforestry Systems 14 (3): 193-205.

Jansen, H.H. et R.M.N. Kucey. 1988. C, N, and S mineralisation of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. Plant and Soil 106: 35-41

Jordan, C.F. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. Principles and their application in management and conservation. John Wiley & Sons, Chichester, UK. p 190

Journel, A. 1975. Guide pratique de geostatistique minière. Centre Géostatistique et de Morphologie Mathématique. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 241 p

Kang B , N.F. Wilson et L. Sipkens. 1981. Alley cropping maize (*Zea mays*) and leucaena (*Leucaena leucocephala* Lam) in southern Nigeria. Plant and Soil 63: 165-179 .

Kang, B.T., G.F. Wilson et T.L. Lawson. 1984. Alley cropping sequentially cropped maize and cowpea with Leucaena on a sandy soil in southern Nigeria. Plant and Soil 85: 267-277.

Kang, B.T. et B. Duguma. 1985. Nitrogen management in alley cropping systems, pp. 269-284, in B.T. Kang et J. Van der Hade (eds.) Nitrogen Management in Farming Systems in Humid and Subhumid Tropics, Institute for Soil Fertility, Haren, The Netherlands.

Kang, BT. et G.F. Wilson. 1987. The development of alley cropping as a promising agroforestry technology, in H.A. Steppler et P.K.R. Nair, (eds.) Agroforestry: A decade of development, ICRAF, Nairobi, Kenya.

Kang, B.T., L. Reynolds et A.N. Atta-Krah. 1990. Alley farming. Advances in Agronomy 43: 315-359.

Kohl, D.H., G. Shearer et J.E. Harper. 1980. Estimates of N_2 fixation based on differences in natural abundance of ^{15}N in nodulating and non-nodulating isolines of soybeans. Plant Physiology 66: 61-65.

Kurdali, F., A.M. Domenach et R. Bardin. 1990. Alder-poplar associations: Determination of plant nitrogen sources by isotope techniques. Biology and Fertility of Soils 9: 321-329.

Lal, R. 1991 Myths and Scientific realities of agroforestry as a strategy for sustainable management for soils in the tropics. Advance in Soil Science. 15: 91-137.

Langkamp, P.J., G.K. Farnell et M.J. Dalling. 1982. Nutrient cycling in a stand of *Acacia holosericea* A Cunn ex G Don. I. Measurements of precipitation interception, seasonal acetylene reduction, plant growth and nitrogen requirement. Australian Journal of Botany 30: 87-106.

Lassus, C. 1987. Croissance exponentielle et logistique des populations, pp. 100-126, in G. Morin (ed.) Une approche mathématique de la biologie, Editions Eska S.A.R.L., Paris.

Lavelle, P. 1987. Interactions, hierarchies et regulations dans le sol : à la recherche d'une nouvelle approche conceptuelle. Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol 24: 219-229.

Lavelle, P., A. Martin, E. Blanchart, C. Gilot, G. Melendez et B. Pashanasi. 1990. Conservation de la fertilité des sols de savane par la gestion de l'activité de la macrofaune du sol, pp. 371-399, in Pieri, C., Bodichon, J., Fontanel, P., Forgue, J.M. (eds.) Savanes d'Afrique, terres fertiles? Comment produire plus et de façon durable en zone de savanes au sud du Sahara. Actes des rencontres internationales: Montpellier, 10-14 Décembre 1990, La Documentation Française, Paris

Lericollais, A. 1972. Sob: Etude géographique d'un terroir serer, Paris, La Haye: Mouton, Atlas des structures agraires au sud du Sahara N° 7, 110 p.

Lericollais, A. et P. Milleville. 1991. La jachère dans les systèmes agro-pastoraux sereer au Sénégal, Document ORSTOM/UR 3G.

MacDicken, K.G. 1990. Agroforestry in the humid tropics, pp. 98-148, in K.G. MacDicken and N.T. Vergara (eds.) Agroforestry: Classification and management, John Wiley & sons, New York.

MacDicken, K.G. et J.B. Raintree. 1991. An overview of multipurpose tree species, pp. 5-8, in D.H. Taylor et K.G. Macdicken (eds.) Research on multipurpose tree species in Asia, Winrock International, Arlington, Virginia.

Marchal, J.Y. 1980. Chronique d'un cercle de l'AOF: Recueil d'archives du poste de Ouhigouya (Haute Volta: 1908-1941), Paris, France. Travaux et Documents de l'ORSTOM N° 195, p. 215.

Mariotti, A., B. Sougoufara et Y.R. Dommergues. 1992. Estimation of nitrogen fixation using the natural abundance method in a plantation of *Casuarina equisetifolia* (Forst). Soil Biology and Biochemistry 24: 647-663.

Mary, B. 1987. Effet du précédent cultural sur la disponibilité du sol en azote minéral. Comptes Rendus de l'Académie d' Agriculture de France 73: 57-69.

Ministère du Developpement Rural du Sénégal. 1986. Etude du secteur agricole-Plan Céréalier. 58 p.

Mtambanengwe, F. et H. Kirchmann. 1995. Litter from tropical savana woodland (Miombo): chemical composition and C and N mineralization. Soil Biology and Biochemistry 27 (12): 1639-1651.

Mulongoy, K. et I.O. Akobundu. 1992. Avantages agronomiques et économiques de l'azote fourni par les légumineuses dans les systèmes de paillis vivant et de culture en couloirs. La Recherche à l'IITA 4: 12-19.

Myers, R.J.K, C.A. Palm, E. Cueva, I.U.N. Gunatillere et M. Brossard. 1994. The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. pp: 81-116, in Woomer P.L., et M.J. Swift (eds.) The Biological of Tropical Soil Fertility, John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom.

Nair, P.K.R. 1993. An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 499 p.

Ndiaye, M. et F. Ganry. 1997. Variation in the biological N2 fixation by tree legumes in three ecological zones from the north to the south of Senegal. Arid Soil Research and Rehabilitation 11 (3): (sous presse).

Ndiaye, M. et D. Annerose. Etude de la croissance racinaire de Gliricidia sepium et de Senna siamea sur un sol ferrugineux tropical de Nioro du Rip en rhizotrons au Sénégal. Document ISRA, 25 p.

Niamai, O.D. 1991. Investigations on decomposition of foliage of woody species using perfusion method. Plant and Soil 139: 239-245.

Oglesby, K.A. et J.H. Fownes. 1992. Effects of chemical composition on nitrogen mineralization from green manures of seven tropical leguminous trees. Plant and Soil 143: 127-132.

Okogun, J.A., K. Mulongoy, C.T.I. Odu et A.A. Agboola. 1994. Screening of multipurpose trees for alley cropping on alfisol and ultisol, pp. 550-562, in M. Sadiki et A. Hilali (eds) Recent Development in Biological Fixation Research in Africa, Hassan II Institute of Agronomy and Veterinary Medecine, Rabat, Maroc.

Ong, C. 1994. La culture en couloirs - une promesse illusoire ? L'Agroforesterie Aujourd'hui 6 (3): 8-11.

Orsini, L. et J.C. Remy. 1976. Utilisation du chlorure de cobaltihexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol (AFES) 4: 269-275.

Palm, C.A. et P.A. Sanchez. 1990. Decomposition and nutrient release patterns of leaves of tree tropical legumes. Biotropica 22: 330-338 .

Palm, C. A. et P.A. Sanchez. 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by lignin and polyphenol contents. Soil Biology and Biochemistry 23: 83-88.

Peggin, C.M. et V. Parera. 1985. The use of Leucaena in Nusa Tenggara Timur, pp. 19-27, in E.T. Crasswell et B. Tangendjaja (eds.) Shrub legumes in Indonesia and Australia, ACIAR Proceedings Series 3, Camberra.

Pélissier, P. 1966. Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance. Saint-Yriex, Imprimerie Fabrègue, 940 p.

Peltier, R. et O. Eyog-Matig. 1988. Les essais d'agroforesterie au Nord-Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques 217: 3-31.

Peoples, M.B., D.F. Herridge et J.F. Bergersen. 1988. Measurement of nitrogen fixation in crop and shrub legumes, pp. 223-238, in Green manure in rice farming. Proceedings of a symposium on sustainable agriculture. 25-29 may 1987. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.

Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savanes: bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara. Ministère de la Coopération et du Développement et CIRAD-IRAT, Paris, 444 p.

PRECOBA (Projet de Reboisements Communautaires dans le Bassin Arachidier du Sénégal). 1982. Etude sociologique: la motivation et les actions des populations à l'égard de l'arbre. Rapport Technique N° 1: 95 pages.

Prinsley, R.T. 1993. The role of trees in sustainable agriculture - an overview, pp. 87-116, in R.T. Prinsley et J. ALLnut (eds.) The role of trees in sustainable agriculture. Forestry Sciences, vol. 43, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht; The Netherlands.

Puig, H., A. Rétiére et P. Salaün. 1993. L'arbre dans les systèmes culturaux du tropique humide: Acquis et lacunes. Rapport de fin d'étude financé par le Ministère de la Recherche, Décision d'aide N° 91.L.0684, Laboratoire de Botanique Tropicale, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, p 132.

Rachie, K.O. 1983. Intercropping tree legumes with annual crops, pp. 103-114, in P.A. Huxley (ed.) Plant Research and Agroforestry, International Council for Research in Agroforestry, Nairobi, Kenya.

Raintree, J.B. 1987. La "D and D" manuel de l'utilisation. La methodologie de diagnostic et de conception en agroforesterie, ICRAF, Naïrobi, Kenya, 125 p.

Rao, M.R., Sharma, M.M. et C.R. Ong. 1990. A study of the potential of hedgerow intercropping in semi-arid India using a two-way systematic design. Agroforestry Systems 11: 243-258.

Rao, M.R. et R. Coe. 1992. Evaluation des résultats de la recherche agroforestière. L'Agroforesterie Aujourd'hui 4 (1): 4-9.

Read, M.D., B.T. Kang et G.F. Wilson. 1985. Use of *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit leaves as a nitrogen source for crop production. Fertlizer Research 8 (2): 107-116 .

Resecrance, R.C., J.L. Brewbaker et J.H. Fownes. 1992. Alley cropping of maize with nine leguminous trees. Agroforestry Systems 17: 159-168.

Rhodes, E., A. Bationo, E.M.A. Smaling et C., Wisker. 1996. Diagnosis: Farming Systems and Soil Fertility. 3. Nutrient Stocks and Flows in West African Soils, pp. 22-32, in A. Uzo Mokwunye, A.de Jager, E.M.A. Smaling (eds.) Restoring and Maintaining the Productivity of West African Soils: Key to Sustainable Development, Miscellaneous Fertilizer Studies N°. 14, Library Congress Cataloging-in-Publication Data, The Netherlands.

Roughley, R.J. 1987. Acacias and their root-nodule bacteria, pp. 45-49, in J.W. Turnbull (ed.) Australian acacias in developing countries. Proceedings of an international workshop at the Forestry Training Centre, ACIAR Proceedings 16, Gympie, Qld., Aust.

Ruellan, A. 1993. La gestion des sols. Nature-Sciences 1 (2): 159-163.

Salez, P. 1988. Compréhension et amélioration de systèmes de culture associées céréale-légumineuse au Cameroun. Thèse de docteur-ingénieur, ENSAM, Montpellier, France, 190 pp + 4 annexes.

Sandhu, J.M., M. Sinha et R.S. Ambaht. 1990. Nitrogen release from decomposing litter of *Leucaena leucocephala* in the dry tropics. Soil Biology and Biochemistry 22 : 859-863 .

Sanginga, N., K. Mulongoy et A. Ayanaba. 1987. Nitrogen fixation by *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit under Nigerian field conditions estimated by N-15 techniques. Biological Agriculture and Horticulture. 3:347-352.

Sanginga, N., S.K.A. Danso, F. Zapata et G.D. Bowen. 1990. Influence of reference trees on N_2 fixation estimates in *Leucaena leucocephala* and *Acacia albida* using ^{15}N-labelling techniques. Biology and Fertility of Soil 9: 341-346.

Sanginga, N., G.D. Bowen et S.K.A. Danso. 1991. Intra-specific variation in P accumulation of *Leucaena leucocephala* and *Gliricidia sepium* as influenced by soil phosphate status. Plant and Soil 133: 201-208.

Sanogo, Z.J.L. 1997. Maîtrise de l'azote dans un système cotonnier-sorgho : Prévision de la fumure organique et azotée en zone Mali-Sud. Thèse de doctorat, ENSA, Montpellier, p 72.

Shearer, G. et D.H., Kohl. 1986. N_2 fixation in field setting: Estimations based on natural ^{15}N abundance. Australian Journal of Plant Physiology 13: 699-756.

Shearer, G., D.H. Khol, R.A. Virginia, B.A. Bryan, J.L. Skeeters, E.T. Nilsen, M.R. Sharifi et P.W. Rundel. 1983. Estimates of N_2 fixation from variation in the natural abundance of ^{15}N in Sonoran Desert ecosystem. Oecologia (Berlin) 56: 365-373.

Shields, J.A. et E.A. Paul. 1973 . Decomposition of 14C-labelled plant material under field conditions. Canadian Journal of Soil Science 53 : 297-306

Snoeck, D. 1995. Interactions entre végétaux fixateurs d'azote et non fixateurs en culture mixte : cas des *Leucaena* spp associés à *Coffea arabica* L. au Burundi. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, Lyon, France.

Sprent, J.I. 1976. Water deficit and nitrogen fixing root nodules, pp. 291-315, in T.T. Kozlowski (ed.) Water-deficit and Plant Growth, Academic Press, New York.

Sprent, J.I. 1986. Potentials for nitrogen-fixing legume trees in the tropics. International Tree Crops Journal 4: 47-54.

Sprent, J.I. et J.M. Sutherland. 1990. Nitrogen fixing woody legumes. Nitrogen Fixing Trees Research Reports 8: 17-31.

Swain, T. 1979. Tannins and lignins, pp. 657-822, in Rosenthal. G.A and Jansen, D.H. (eds) Herbivores. Their interaction with Secondary Plant Metabolites, Academic Press, New York.

Swift, J.M. 1987. Tropical soil biology and fertility (TSBF): inter-regional research planning workshop. Biology International, Special issues 13, 68p.

Uguen, K. 1996 . Effets de litières d'espèces ligneuses naturelles et introduites de jachère sur la disponibilité de l'azote du sol pour les plantes. Mémoire de D.E.A, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 30 p + 6 annexes + 2 illustrations.

Vallis, I et L.J. Jones. 1973. Net mineralisation of nitrogen in leaves and leaf litter of *Desmodium intortum* and *Phaseolus atropurpureus* mixed with soil. Soil Biology and Biochemistry 5: 391-398.

Van der Pol, F. 1992. Soil mining. An unseen contributor to farm income in southern Mali, Bulletin 325, Royal Tropical Institute (KIT), Amsterdam, Netherlands.

Van Noordwiijk, M. et Y.R. Dommergues. 1990. Agroforesterie et fertilité des sols / nodules racinaires : la 12e hypothèse. l'Agroforesterie Aujourd'hui 2: 9-10.

Vigil, M.F. et D.E. Kessel. 1991. Equations for estimating the amounts of nitrogen mineralized from crop residues. Soil Science Society of American Journal 55: 757-761.

Vincent, J.M. 1970. A manual for the practical study of the root nodule bacteria. International Biology Programme Handbook N° 15, Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Virginia, R.A. 1986. Soil development under legume tree canopies. Forest Ecology and Management 16: 69-79.

Virginia, R.A., M.B. Jenkins et W.M. Jarrell. 1986. Depth of root symbiont occurrence in soil. Biology and Fertility of Soil 2: 127-130.

Weeraratna, C.S. 1979. Pattern of nitrogen release during decomposition of some green manures in a tropical alluvial soil. Plant and Soil 53: 287-294.

Wieder, R. et G. Lang. 1981. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. Ecology 63: 1636-1642.

Willey, R.W. et D.S. Osiru. 1972. Studies on mixtures of maize and beans with particular reference to plant population. J. Agric. Sci. Camb., 79: 517-529.

Wilson, J. 1990. Agroforesterie et fertilité des sols / la onzième hypothèse : l'ombrage. l'Agroforesterie Aujourd'hui 8: 14-15.

Wong, M.F. et S. Nortcliff. 1995. Seasonal fluctuations of native available N and soil management implications. Fertilizer Research 42: 13-26.

Woomer, P.L. et J.S.L. Ingram. 1990. The biology and fertility of tropical soils. Report to the Tropical Soil Biology and Fertility Programme (TSBF), Nairobi, TSBF c/o UNESCO, 44p.

Xu, Z.H., P.G. Saffigna, R.J.K. Myers et A.L. Chapman. 1993 a. Nitrogen cycling in leucaena (*Leucaena leucocephala*) alley cropping in semi-arid tropics. I: Mineralization of nitrogen from plant residues. Plant and Soil 148: 63-72.

Xu, Z.H., P.G. Saffigna, R.J.K. Myers et A.L. Chapman. 1993 b. Nitrogen cycling in leucaena (*Leucaena leucocephala*) alley cropping in semi-arid tropics- II: Response of maize growth to addition of nitrogen fertilizer and plant residues. Plant and Soil 148: 73-82.

Yamoah, C.F., A.A. Agboola et G.F. Wilson. 1986 a. Nutrient contribution and maize performance in alley cropping systems. Agroforestry Systems 4: 247-254.

Yamoah, C. F., A.A. Agboola et K. Mulongoy. 1986 b. Decomposition, nitrogen release and weed control by prunings of selected alley cropping shrubs. Agroforestry Systems 4: 239-246

Yoneyama, T. 1987. N_2 fixation and natural abundance of leguminous plants and Azolla. Bulletin of National Institute of Agrobiological Resources (Japan) 3: 59- 87.

Yoneyama, T., K. Kouno et J. Yazaki. 1990 a. Variation of natural ^{15}N abundance of crops and soils in Japan with special reference to the effect of soil conditions and fertilizer application. Soil Science and Plant Nutrition 36: 667-675.

Yoneyama, T., T. Mukarami, N. Boonkerd, P. Wadisirisuk, S. Siripin et K. Kouno. 1990b. Natural ^{15}N abundance in shrub and tree legumes, Casuarina and non fixing plants in Thailand. Plant and Soil 128: 287-292.

Yoneyama, T., T. Muroka, T. Murakami et N. Boonkerd. 1993. Natural abundance of ^{15}N in tropical plants with emphasis on tree legume. Plant and Soil 153: 293-295.

Young, A. 1986. Land evaluation and agroforestry diagnosis and design towards a reconciliation of procedures. Soil survey and Land Evaluation 5: 61-76.

Young, A. 1989 a. Agroforestry for soil conservation. Science and practise in agroforestry N°4, Commonwealth Agricultural Bureau International, Wallingford.

Young, A. 1989 b. Dix hypothèses pour la recherche sols / agroforesterie. l'Agroforesterie Aujourd'hui 1: 13-16.

Young, A. 1995. Agroforesterie et entretien de la fertilité du sol, pp. 63-121, in L'Agroforesterie pour la conservation du sol (traduit de l'anglais par Michel Baumer), Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA), Wageningen, Pays-Bas.

Zakra, N., M. Ouvrier et G. De Taffin. 1991. Partitioning of ^{15}N labelled mineral nitrogen in Acacia and coconut, pp. 379-386, in Proceedings of an International Symposium on the Use of Stable Isotopes in Plant Nutrition, Soil Fertility and Environmental Studies, jointly organized by the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), and held in Vienna, 1-5 October 1990, IAEA, Vienna.

Zakra, N., R.W. Weaver et G. De Taffin. 1993. Distribution of ^{15}N from ammonium fertilizer in field grown *Acacia*. Plant and Soil 15: 147-150.

Zapata, F. 1990. Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies, pp. 61-127, in G. Hardarson (ed.) Use of Nuclear Techniques in Studies of Soil-Plant Relationships. Training Course series N° 2, International Atomic Energy Agency, Vienna.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste synoptique des activités de recherche en agroforsterie ménées au Sénégal

Technologies forestières

Parcs

Etude du parc agroforestier de *Faidherbia albida* au Sénégal

Utilisation du parc à ronier au Sénégal: Opératios techniques et dispositions réglementaires

Etude socio-économique dans le parc à *Sterculia setigera* ou "Mbepp"

Dynamique des interactions arbre/herbe en zone tropicale sèche: effets sur la composition floristique et la productivité des pâturages sahéliens au Nord Sénégal

Culture en couloirs

La culture en couloirs au Sud Sénégal

Performance de diverses espèces utilisées dans la culture en couloirs à Nioro

Brise-vent

Les brise-vent dans les amenagements hydr-agricoles de la vallée du fleuve Sénégal

Jachère et et défense et restauration des sols

La production ligneuse des jachères et ses utilisations par les populations

Influence du temps de jachère sur les paramètres physico-chimiques du sol et sur la biomasse racinaire dans les régions semi-arides du Sénégal

Recherche de techniques simples de lutte anti-érosive en agroforesterie

Haies vives

Réactions de certains espèces utilisables en haies vives aux techniques de proposition

Etude de comportement de certaines espèces épineuses en haies vives

Banques fourragères : Essais "banques fourragères à Bambey et Nioro du Rip

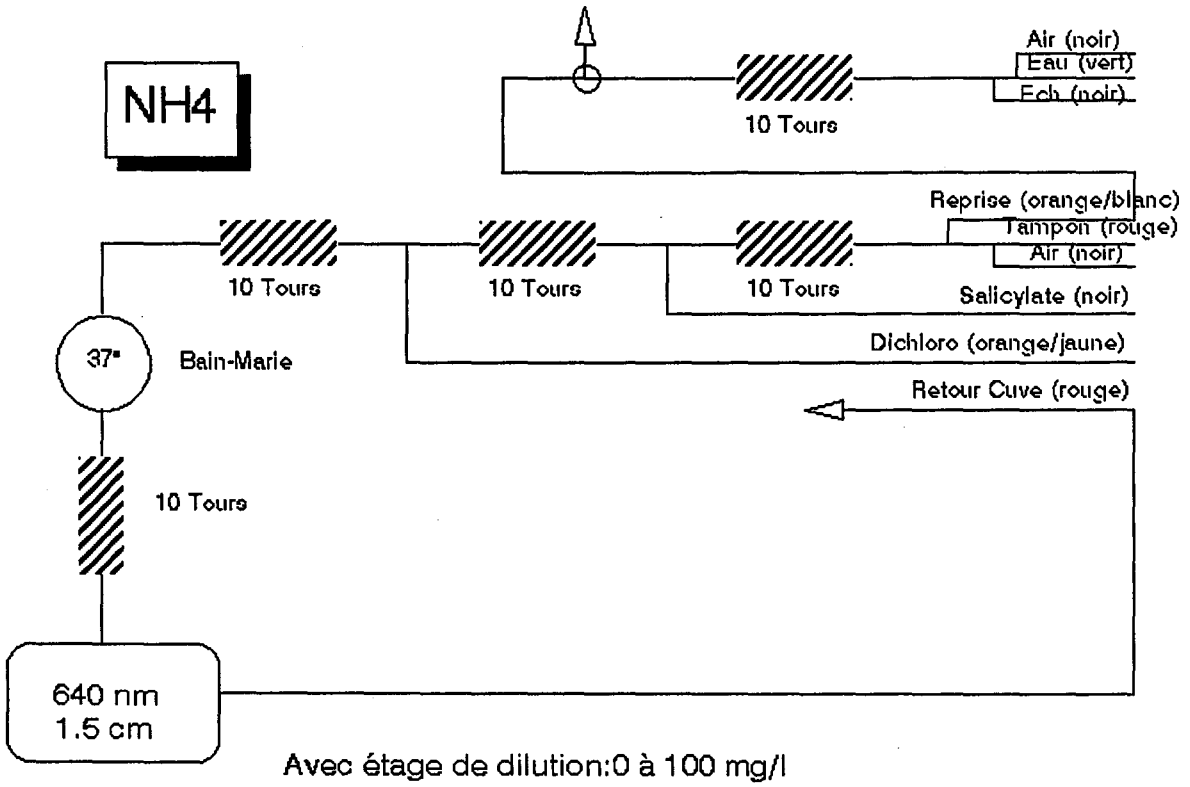
Recherche d'appui

Gestion de la matière organique dans les systèmes agricoles au Sénégal

Rôle des arbres fixateurs d'azzote dans le maintien de la fertilité des sols et les transferts d'azote des arbres aux cultures

Agroforesterie et recherche sur les mycorhizes au Sénégal

Annexe 2: Dosage colorimétrique de N-NH_4 (ROMERO, 1995)



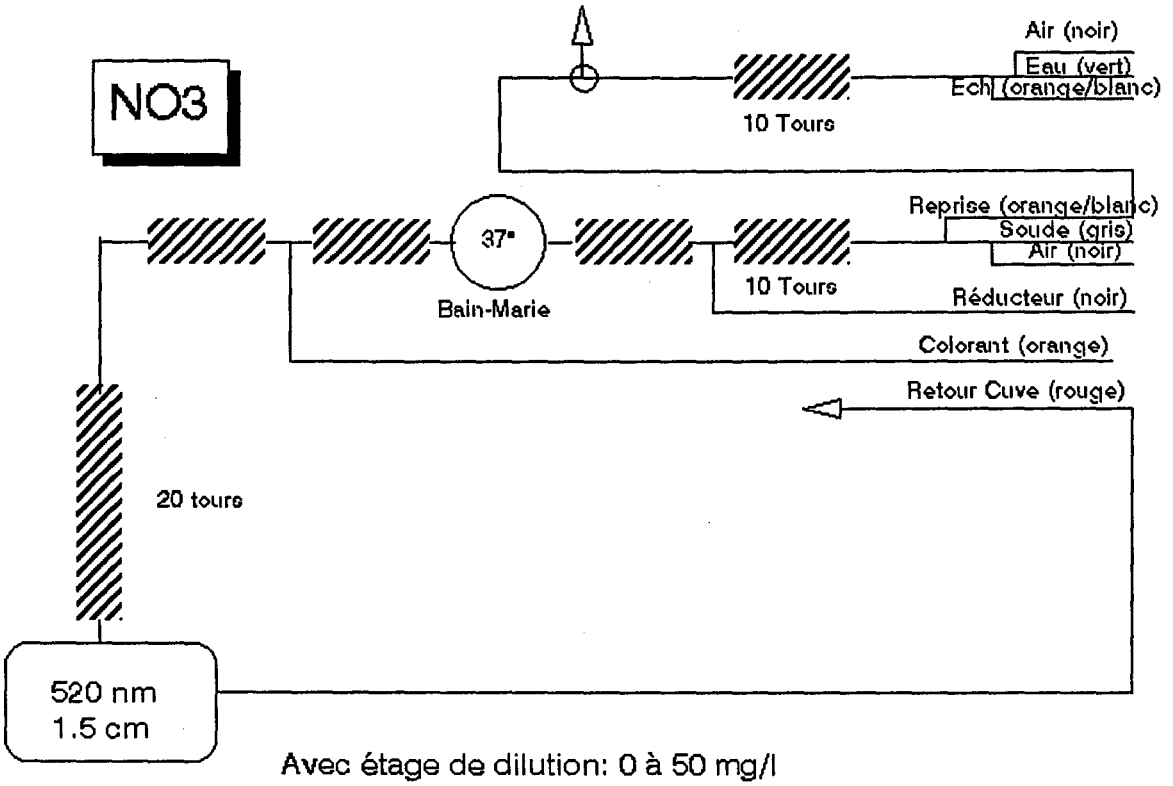
Avec étage de dilution:0 à 100 mg/l

Sans étage de dilution:0 à 10 mg/l

REACTIFS

TAMPON	NaOH	25g	
	Tartrate K Na	10g	1 litre
	EDTA	10g	
	BRIJ 35	5 gouttes	
SALYCILATE	Salycilate Na	42.5g	1 litre
	Nitroprussiate Na	0.3g	
DICHLORO	Dichloroisocyanurate Na	1.25g	500ml
	NaOH	6g	

Annexe 3: Dosage colorimétrique de N-NO_3 (ROMERO, 1995)



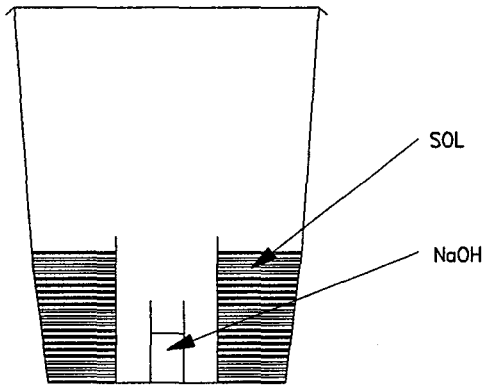
Avec étage de dilution: 0 à 50 mg/l

Sans étage de dilution: 0 à 5 mg/l

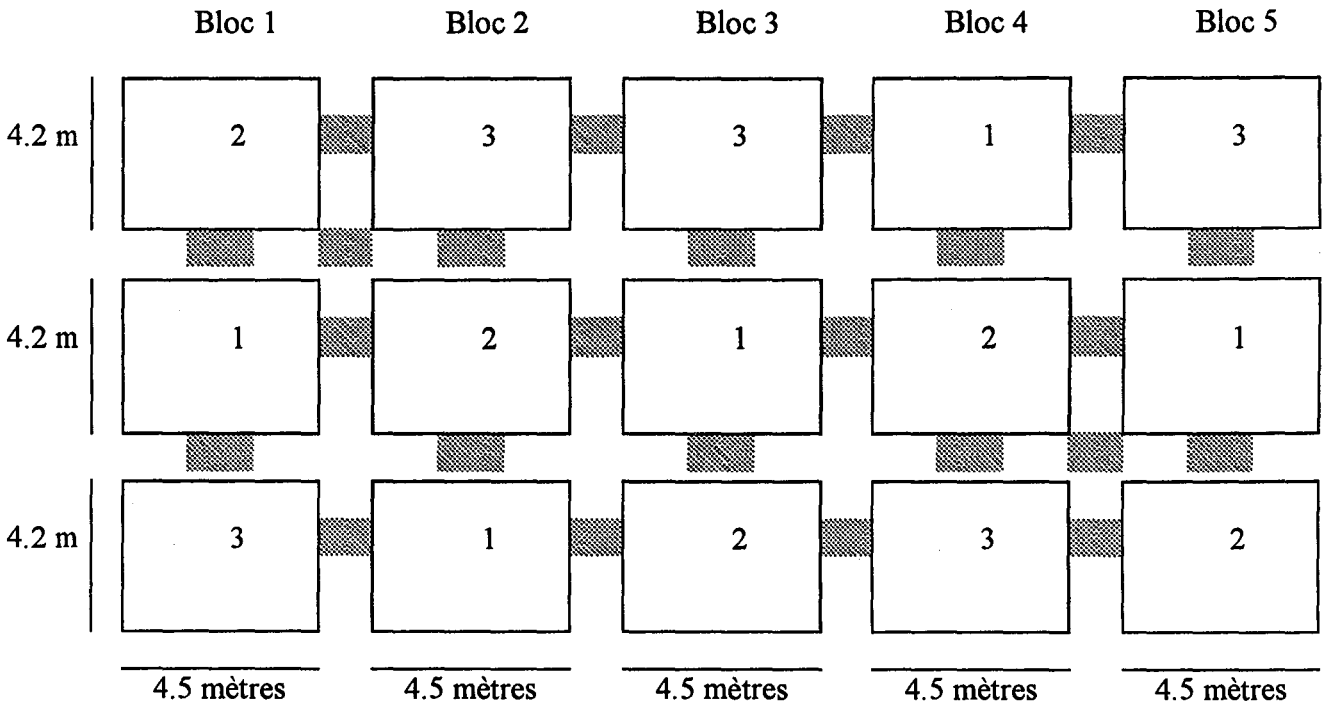
REACTIFS

SOUDE	NaOH	8g	1 litre
SULFATE DE CUIVRE	$CuSO_4,5H_2O$	0.28g	500ml
REDUCTEUR	Sulfate d'hydrazine Sulfate de cuivre	0.56g 20 ml	500ml
COLORANT	Naphtyl Ethylène Diamine Sulfamilamide Acide orthophosphorique	0.5g 10g 100ml	1 litre

Annexe 4 : Dispositif de piégeage du carbone minéralisé.



Annexe 5 : Plan de l'essai au champ sur la recherche de la synchronisation entre l'offre en azote des émondes de Gliricidia et la demande en azote par le maïs.



Emplacement des sachets de décomposition

Plan de l'essai "Effet des émondes sur le rendement du maïs"
Cinétique de biodégradation des émondes de Gliricidia au champ.

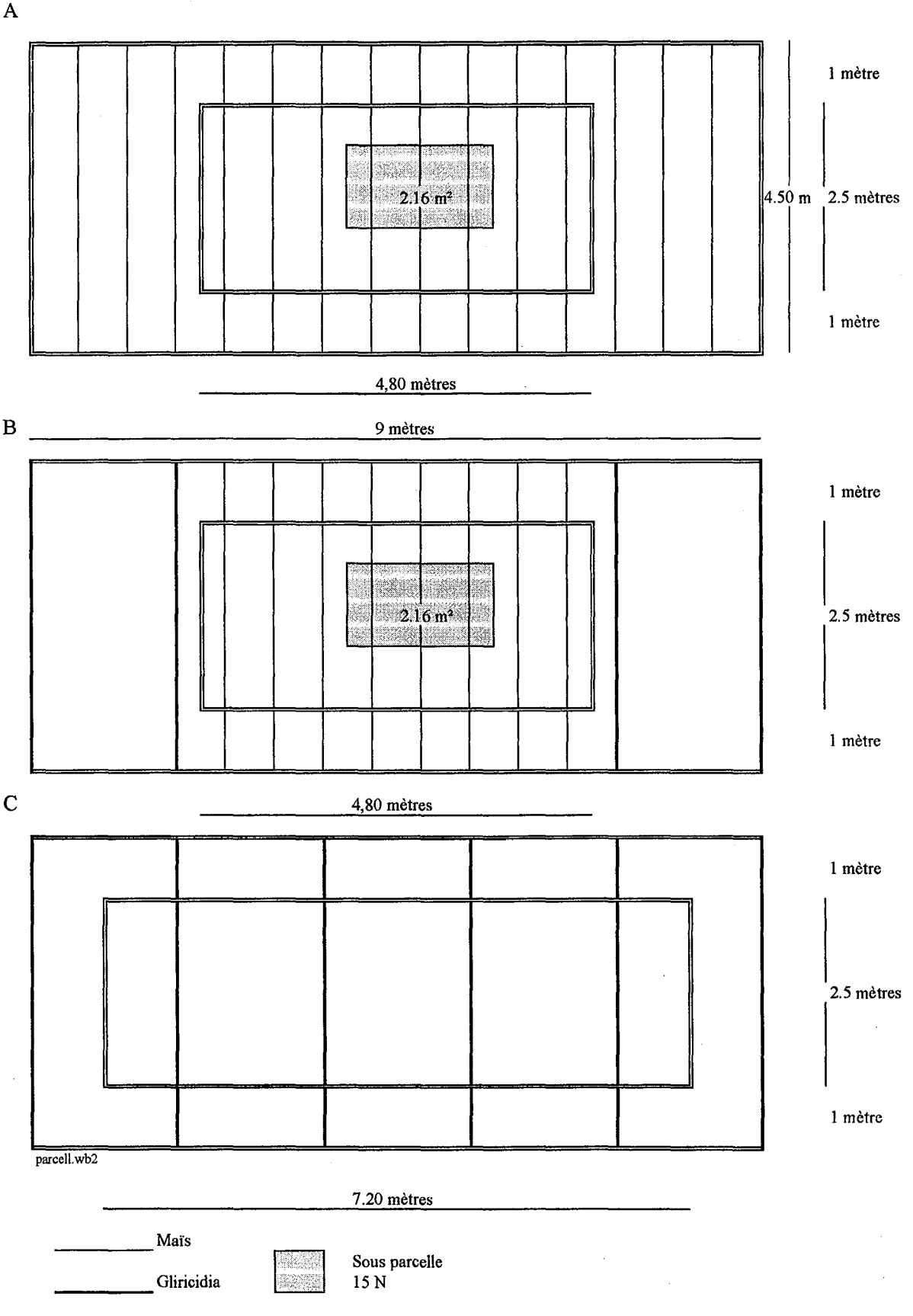
1 :Témoin sans émondes ni engrais azoté
2 Apport d'engrais azoté 100 kg N par hectare
3 Application d'émondes de Gliricidia 3 t M.S / ha

Annexe 6 : Recapitulation des preuves pour 10 hypothèses sols-agroforesterie d'après Young (1989 b)

Hypothèse	Evidence directe	Evidence indirecte
1. Lutte anti-érosive	*	**
2. Matière organique	*	**
3. Propriétés physiques du sol	*	**
4. Fixation de l'azote	**	0
5. Apport accru d'éléments nutritifs	0	*
6. Meilleur recyclage des éléments nutritifs	*	**
Corrolaire: synchronie	*	**
7. Amélioration de l'acidité	0	-
8. Disponibilités en eau:		
brise-vent	**	0
autre systèmes	0	0
9. Restauration du sol	0	*
10. Le rôle des racines	*	**
L'hypothèse générale sols-agroforesterie	*	**

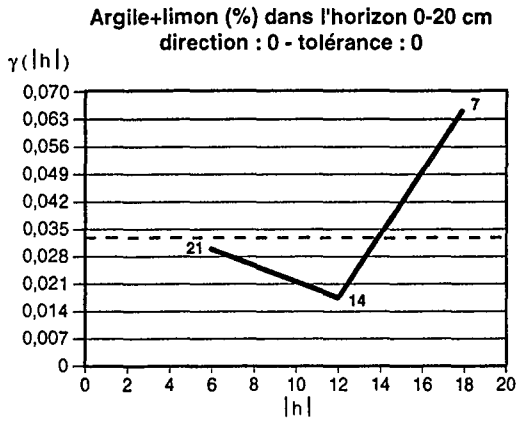
** = forte preuve, * = preuves positives mais rares, - = preuve négative, 0 = pas de preuve

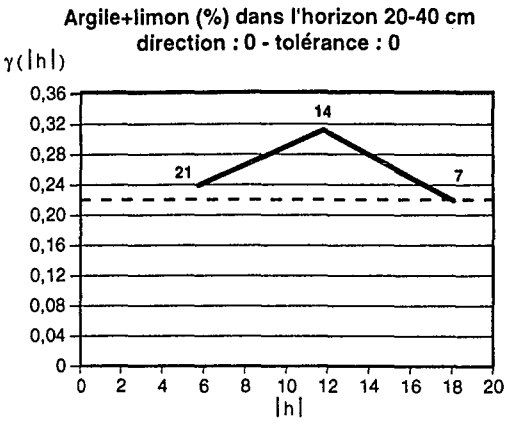
Annexe 7: Plan des parcelles et microparcelles 15N de l'essai "culture en couloirs"

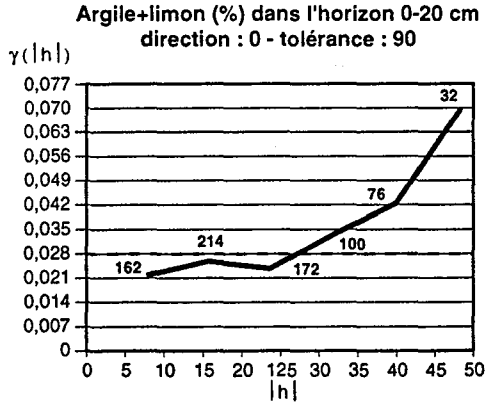


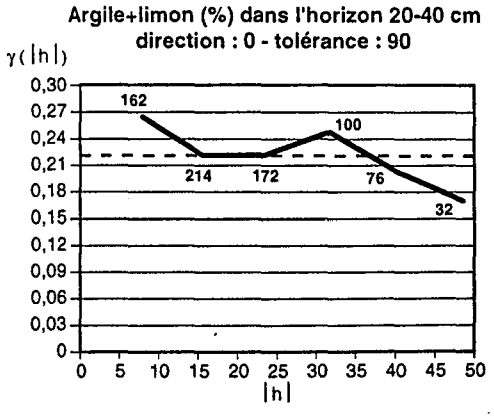
Plan des différentes parcelles de l'essai cultures en couloir
A: maïs pur. B: Maïs + Gliricidia. C: Gliricidia pur

Annexe 8: Semivariogrammes de la variation spatiale du dispositif de l'essai en couloirs



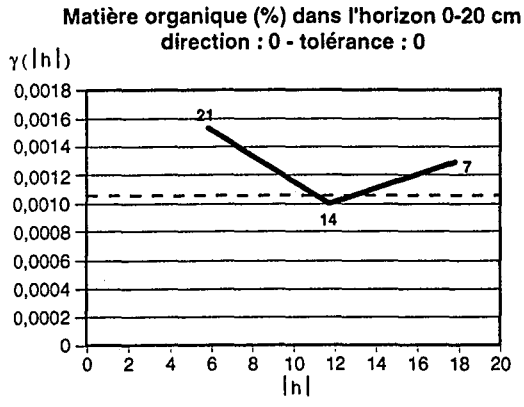


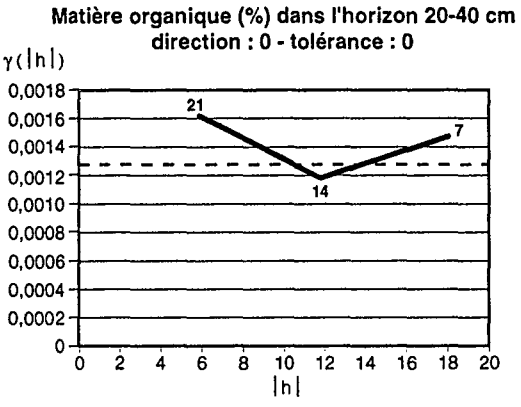


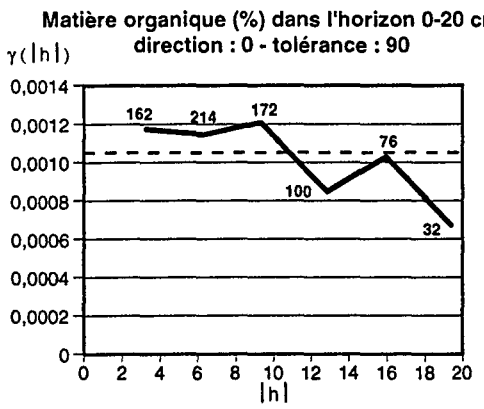


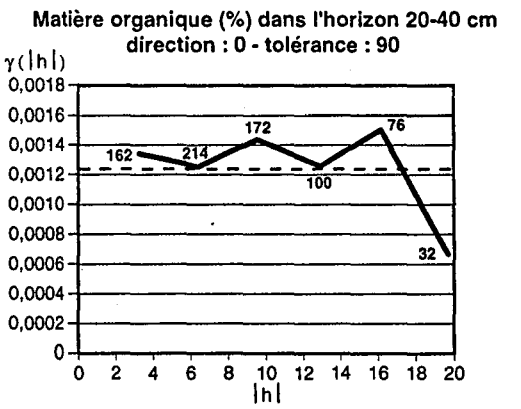
Semivariogrammes du taux d'argile+limon dans les horizons 0-20 et 20-40 cm de sol

(τ(h) = écart quadratique moyen entre les valeurs situées aux points Z et Z+h ;
les valeurs affectées aux points du graphe indiquent le nombre de couples à un point).



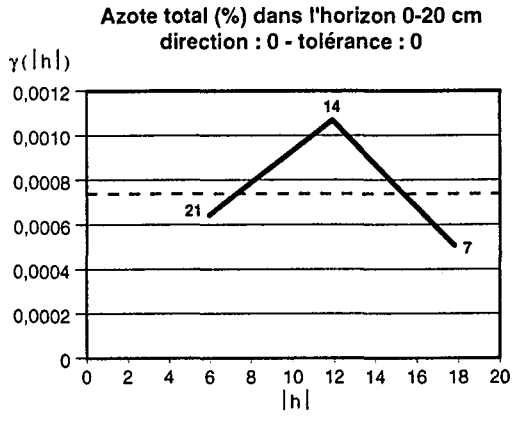


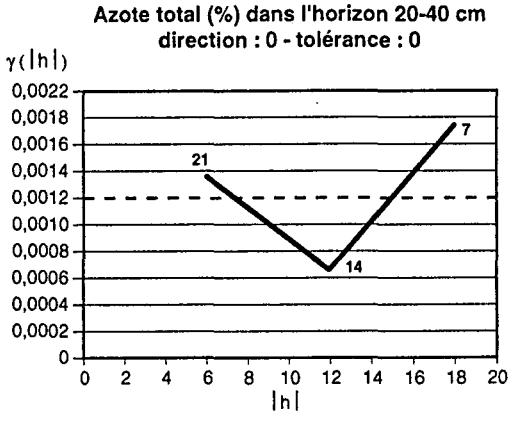


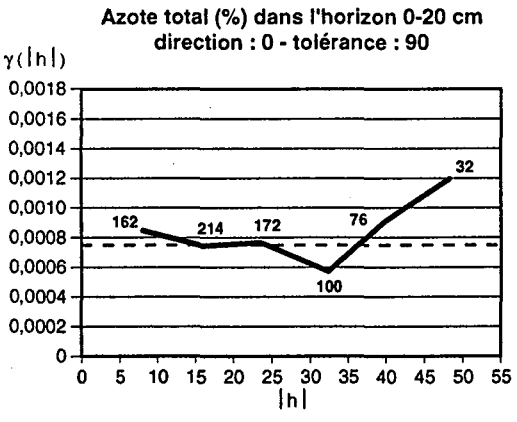


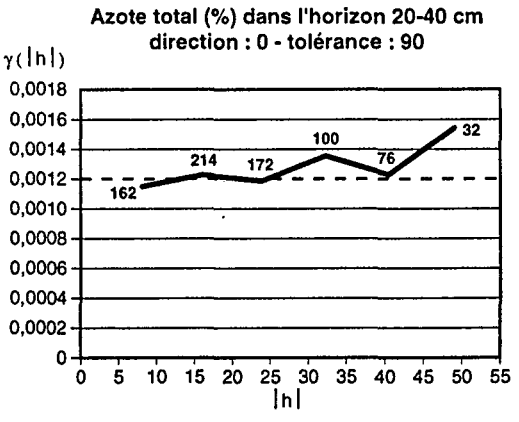
Semivariogrammes du taux de matière organique dans les horizons 0-20 et 20-40 cm de sol

(τ(h) = écart quadratique moyen entre les valeurs situées aux points Z et Z+h ;
les valeurs affectées aux points du graphe indiquent le nombre de couples à un point).



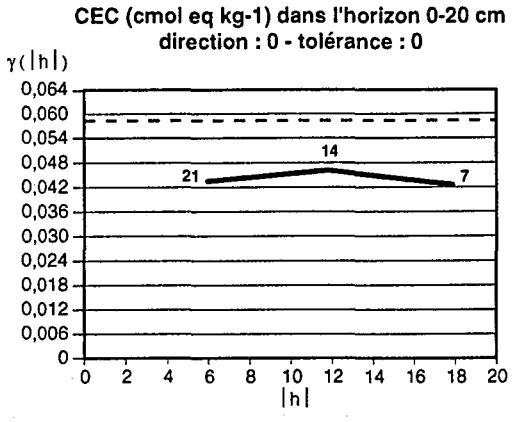


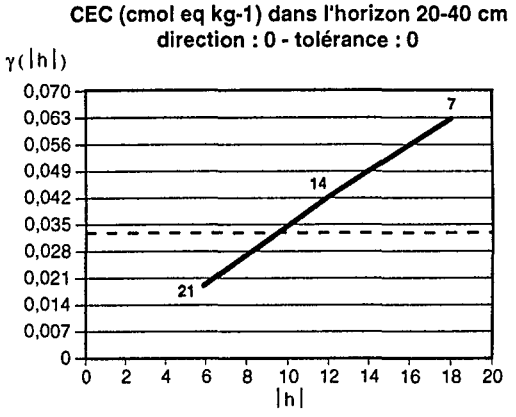


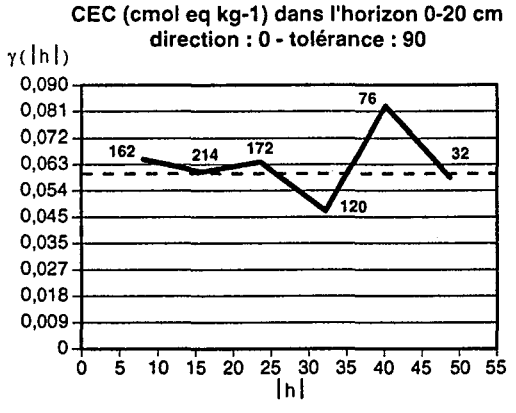


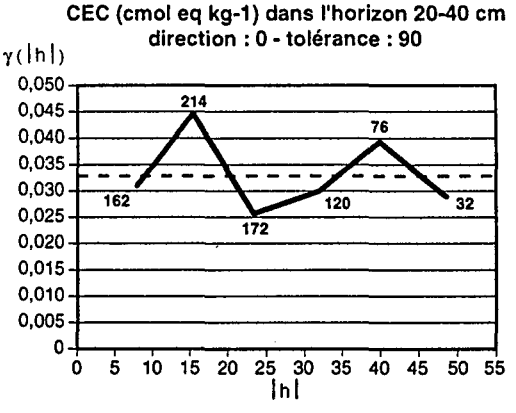
Semivariogrammes de la teneur en N total du sol dans les horizons 0-20 et 20-40 cm de sol

(τ(h) = écart quadratique moyen entre les valeurs situées aux points Z et Z+h ;
les valeurs affectées aux points du graphe indiquent le nombre de couples à un point).



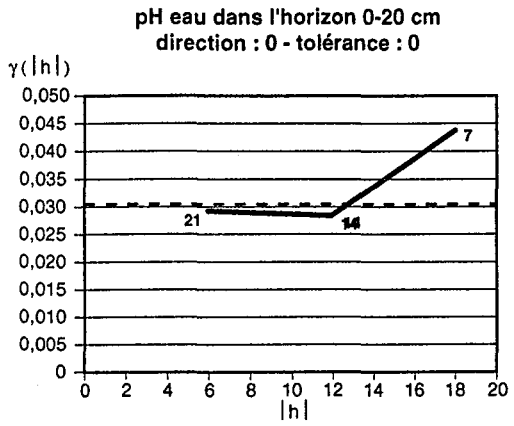


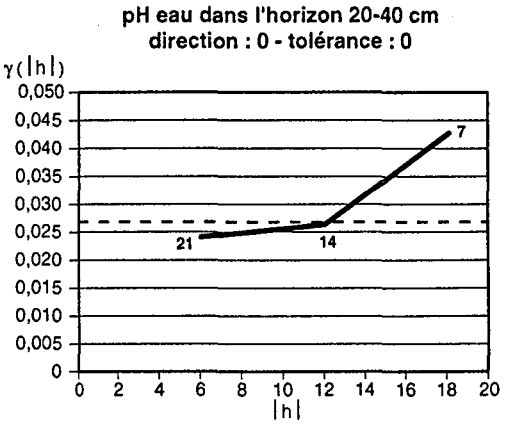


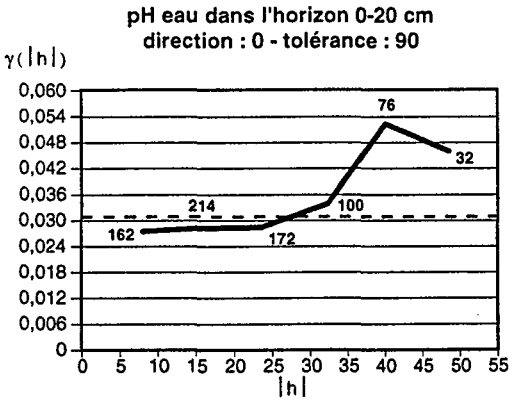


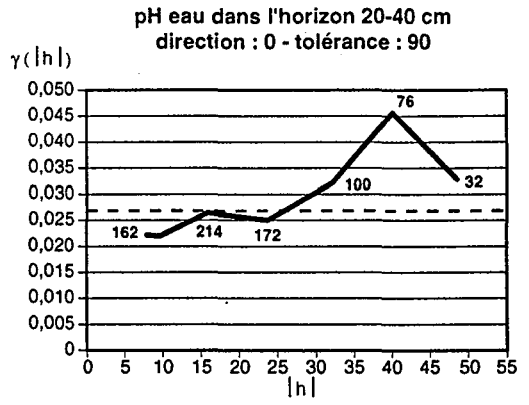
Semivariogrammes de la CEC dans les horizons 0-20 et 20-40 cm de sol

(τ(h) = écart quadratique moyen entre les valeurs situées aux points Z et Z+h ;
les valeurs affectées aux points du graphe indiquent le nombre de couples à un point).









Semivariogrammes du pH (eau) dans les horizons 0-20 et 20-40 cm de sol

(τ(h) = écart quadratique moyen entre les valeurs situées aux points Z et Z+h ;
les valeurs affectées aux points du graphe indiquent le nombre de couples à un point).

INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :
Monsieur DOMMERGUES, Directeur de Recherches CNRS, Université de Nice,
MadameDOMENACH, Ingénieur de Recherches CNRS, Université de Lyon.

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur NDIAYE Mamadou

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX

à soutenir devant l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, une thèse intitulée :
"Alimentation azotée du maïs fondée sur la fixation de N2 et le recyclage d'émondes de légumineuses arbustives en agroforesterie : cas du Centre-Sud Sénégal."

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : **"SCIENCES AGRONOMIQUES"**

Fait à Vandoeuvre le, **07 Février 1997**
Le Président de l'I.N.P.L.,

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE NANCY

J. HARDY

SARL LA GOUTTE D'ENCRE
34 000 Montpellier - France
Tél : 04.67.65.30.96

SUMMARY

Low rates of chemical fertilizer applied on cereals in West Africa and lack of manure has led agronomists to look for other nutrient sources for cereal crops. This study was conducted within the framework of the development of an agroforestry system in which prunings of nitrogen-fixing trees were used as an alternative source of nutrients.

The scientific approach followed has three main steps: (i) diagnosis of nitrogen fixation by tree legumes growing under natural conditions using natural isotopic ^{15}N abundance technique (ii) characterization of nitrogen supply by tree prunings and their contribution on nitrogen uptake by maize (iii) in the field, quantification of contributions of soil, prunings and fertilizer on nitrogen uptake by maize, using ^{15}N labelling technique.

The diagnosis on nitrogen-fixin tree legumes growing under natural conditions reveals a rainfall threshold below which the nitrogen fixation is limited. Two hypotheses were made to explain the low level of the nitrogen fixation: (i) native *Bradyrhizobium* strains develop and express themselves only when host plants are grown for a long period in a given zone (ii) negative interaction between soil / climatic conditions do not alllow good survival of native *Bradyrhizobium* in the soil. Two characteristics of prunings: capacity of nitrogen supply and kinetics of biodegradation (half-life time) are measured in laboratory and validated under field conditions; they allow the set up of a predicting model of nitrogen supply by tree prunings. Optimal sowing date of maize and pruning period of tree legume are modelized to adjust nitrogen supply to nitrogen uptake by maize. To do so, the following parameters are taken into account (a) indicators of prunings (b) rainfall series on a long period of time (c) characteristics of cereal variety (d) soil characteristics. Contributions of mineral fertilizer, soil and tree prunings to nitrogen uptake by cereal are evaluated. Among those, the contribution of nitrogen fixation in tree prunings accounts for the role of N_2 fixation in the durability the cereal based-agroforestry system. The Land Equivalent Ratio (LER) in alley cropping, is 0,.90 and 1.6, respectively, when the maize pure crop is fertilized and unfertilized; this indicates the good biological efficiency of the agroforestry system..

The agroforestry system proposed is performant and requires few expensive inputs. So, in theory it presents advantage in regions with high demographic pressure as the Peanut Basin of Senegal. However, farm diversity and socio-economic constraints of farmers should be considered before the agroforestry system be adopted.

Key-words : Senegal, nitrogen cycle, alley cropping, maize, tree legumes, biodegradation of prunings, nitrogen fertilizer, N_2 fixation

RESUME

Les contraintes à la fertilisation minérale dans les cultures céréalières en Afrique de l'Ouest conduisent les agronomes à rechercher des substituts aux engrais. L'objectif de la présente étude est de développer un système agroforestier dans lequel les émondes de d'arbre fixateurs d'azote sont utilisés pour la fertilisation du maïs.

La démarche scientifique met en oeuvre la méthodologie azote 15et comprend trois phases: (i) une phase de diagnostic de la fixation d'azote en milieu réel (ii) une phase, en milieu contrôlé, de caractérisation des émondes et de quantification de leur contribution à la nutrition azotée du maïs (iii) une phase de retour en milieu réel pour déterminer les contributions du sol, des émondes et de l'engrais à l'alimentation azotée du maïs.

Nous mettons en évidence le long d'une séquence nord-sud une fixation réelle de N_2 (FRN) élevée au delà de 1000 mm de pluie et faible en deça de 700 mm. Dans ce dernier cas, nous montrons que l'inoculation de *Bradyrhizobium* permet d'accroître fortement FRN. Deux caractéristiques des émondes: l'une de capacité (azote biodégradable) et l'autre de cinétique (demi-vie) mesurées au laboratoire et validées au champ permettent de déboucher sur un modèle de prévision de l'offre en azote. Par la suite, nous développons un modèle d'optimisation des dates de semis du maïs et d'émondage de l'arbre qui permet d'ajuster l'offre à la demande en azote. Ce modèle prend en compte (a) les indicateurs relatifs aux émondes (b) les séries pluviométriques sur une longue période (c) les caractéristiques de la céréale (d) les caractéristiques du sol. Les contributions de l'engrais, du sol et des émondes à la nutrition azotée de la céréale sont déterminées. Parmi celles-ci, l'azote fixé (N_2) contenu dans les émondes rend compte du rôle de la FRN dans la durabilité du système agroforestier. A Nioro (isohyète 600 mm) cette contribution est de 7,5 % ; mais elle passerait à 25 % si la fixation de N_2 de l'arbre atteignait les valeurs de 75% mesurées dans le sud du pays. L'Indice de Surface Equivalente (ISE) de la culture en couloirs est respectivement 0,90 et 1,60, dans le cas d'une culture pure de maïs avec engrais et dans celui d'une culture pure de maïs sans engrais; ceci traduit la bonne efficience biologique du système agroforestier étudié.

Le système agroforestier proposé est performant et exige peu d'intrants coûteux. De ce fait, il présente un grand avantage en région à forte pression démographique où la terre est une ressource rare comme dans le Bassin Arachidier du Sénégal. Dans la pratique, il reste à franchir une étape essentielle: la mise en oeuvre de ce système en fonction de la diversité des exploitations paysannes et des contraintes socio-économiques.

Mots-clés: Sénégal, Cycle de l'azote, Culture en couloirs, Maïs, Légumineuses arbustives, Fixation de N_2, Biodégradation des émondes, Engrais azoté.