

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

présentée à l'école Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

pour obtenir le DIPLOME DE DOCTORAT

Formation Doctorale : Science du sol
Ecole Doctorale : Biologie Intégrative
Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés

DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE ET DE L'AZOTE DANS LE SYTEME MUCUNA-MAÏS SUR UN SOL FERRALLITIQUE (TERRES DE BARRE) AU SUD-BENIN

par

AZONTONDE Hessou Anastase

Soutenue le 2 Mai 2000 devant le jury composé de :

Lucile JOCTEUR MONTROZIER : Directeur de Recherche DR2 CNRS Lyon, Rapporteur

Bernard NICOLARDOT : Chercheur à l'INRA REIMS, Rapporteur

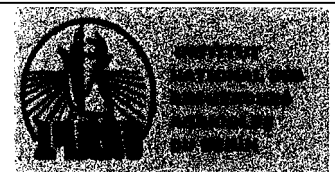
Christian FELLER : Directeur de Recherche IRD Piracicaba BRESIL, Directeur de thèse

Francis GANRY : Chercheur au CIRAD Montpellier, Examineur

Jean-Claude REMY : Professeur à l'ENSAM, Président de jury



Institut de recherche
pour le développement



AVANT- PROPOS

Avant de présenter les résultats de ce mémoire qui est la synthèse d'un programme de recherche exécuté de 1988 à 1996, sur le terrain et au Laboratoire du Centre National d'Agropédologie (CENAP) à Agonkanmey au Bénin, au Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC) à l'IRD et au Laboratoire de l'unité de Recherches et d'Analyses du CIRAD à Montpellier en France. Je tiens à remercier tout le personnel de ces laboratoires.

C'est tout d'abord à Monsieur Christian FELLER, à qui je dois l'initiative et le sujet de cette thèse, et qui m'a suivi malgré son éloignement et ses occupations multiples, en usant de toute sa patience et de sa rigueur dans la lecture des manuscrits de ce mémoire, que j'exprime toute ma gratitude et ma profonde reconnaissance. Il a à travers le projet PROSE (CNRS-IRD) qu'il a dirigé, assuré une grande partie du financement des travaux de ce mémoire. Qu'il en soit vivement remercié.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur Eric ROOSE qui m'a donné l'occasion d'arriver en France pour participer en 1993 à la 10^è réunion du réseau érosion. Ceci m'a permis de prendre les contacts en vue de compléter et valoriser les résultats de mes recherches qui font l'objet de cette thèse.

Mes plus vifs remerciements vont à Monsieur Jean-Claude REMY qui a accepté mon inscription et la direction de cette thèse. Il a de plus porté un grand intérêt à ce travail et m'a prodigué de précieux conseils scientifiques qui m'ont particulièrement aidé dans l'analyse de mes résultats.

Monsieur Francis GANRY a accepté constituer avec moi le binôme pour le projet Fac-équipe qui m'a fourni l'équipement et le financement d'une partie des travaux de cette thèse. Il m'a aidé grâce à son expérience tropicale à pénétrer le "monde complexe de l'azote" dans les sols tropicaux. Je lui exprime toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont à Monsieur Jean DETONGNON Directeur Général de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, pour avoir accepté de prendre en considération et envoyé à des sources de financement ma demande d'aide pour la finalisation de ma thèse

et à Madame MATTHES CTP du projet AGRAN-GTZ, pour avoir accepté de financer cette phase.

Monsieur Georges DE NONI responsable du LCSC, m'a accepté au laboratoire et m'a autorisé à accéder aux appareils informatiques. Je lui adresse ici tous mes remerciements.

Je remercie également Mesdames Evelyne GAVINELLI et Brigitte LE ROUGET pour avoir effectué le dosage du carbone et azote totaux.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Bernard BARTHES qui a beaucoup contribué à mon arrivée à Montpellier pour la soutenance de la thèse et à Madame LARRE-LARROUY et Mademoiselle Anne-lise VIALA pour le soutien qu'elles m'ont apporté au cours des travaux.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Robert OLIVER et José ROMERO du laboratoire du CIRAD, pour m'avoir aidé à la détermination de l'azote minéralisable.

Mes remerciements vont particulièrement à Messieurs Alain ALBRECHT, Didier BLAVET, Marc PANSU et Marc VIENNOT pour leurs encouragements tout au long de ce travail.

Je tiens aussi à remercier Mesdames Régine CHAUME, Ginette ARNAQUE et Monsieur Laurent THURIES pour leur aide au cours des travaux de finalisation de la thèse.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Marc ROESCH du service formation du CIRAD pour avoir fait aboutir le dossier du Projet Fac-équipe, sans lequel je n'aurais jamais eu d'équipement informatique pendant toute la durée de la phase rédactionnelle de la thèse.

Je remercie Monsieur Adrien BOKO ancien Directeur du CENAP, qui a favorisé mes nombreux séjours de courte durée en France et Monsieur EHOUINSOU Directeur de l'Unité de Recherche Zootechnique et Vétérinaire (URZV) pour ses précieux conseils et son soutien moral.

Que soit remercié aussi tous les collègues chercheurs de l'INRAB, de l'Université Nationale du Bénin (UNB), du Centre Béninois des Recherches Scientifiques et Techniques (CBRST), des Organisations Non Gouvernementales (ONG), et plus particulièrement tout le personnel du CENAP pour l'intérêt qu'ils ont toujours manifesté pour ce travail de thèse.

Je dis également grand merci à mon frère et ami Valentin HOUNYE qui n'a ménagé aucun effort, malgré ses nombreuses occupations, pour m'apporter depuis le début jusqu'à la fin de ce travail, son soutien moral.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Narcisse DJEGUI pour l'intérêt qu'il porte à ce travail à travers l'importante documentation qu'il m'a fournie.

Je ne saurais oublier mes beaux frères et belles soeurs KPACHAVI Bertrand Loréano, Franck (Kiki), Claire (Tanti C) et autres, qui résident à Paris et Grigny et qui m'ont aidé dans les moments difficiles.

Je ne saurais terminer les remerciements sans oublier tous ceux qui, de près ou de loin, par leur soutien moral, matériel ou spirituel, ont oeuvré pour ce travail.

J'associe à mes remerciements mon frère aîné HOUNGUE AZONTONDE René maire de la commune urbaine d'Agamé, qui a su m'encourager tout le long de mes études, et mes enfants dont le souci majeur est de voir la fin heureuse de ce travail.

Je dédie cette thèse à ma mère Nassotindé MEHOUMONTO décédée pendant que j'étais au séminaire Franco-Africain (SOLTROP) à Lomé en 1989 et à mon père HOUNGUE Azontondé Lucien qui a beaucoup souhaité voir l'aboutissement de ce travail, mais qui est malheureusement décédé le 16 mai 1998.

Paix à leur âme.

RESUME

Depuis des décennies, les sols du Bénin sont en proie à une dégradation importante suite à leur surexploitation. Cette dégradation affecte tout particulièrement les sols ferrallitiques sableux à argilo-sableux du sud-Bénin communément appelés "terres de barre". Ce qui entraîne une baisse constante des rendements et menace l'autosuffisance alimentaire. Pour restaurer ces sols dégradés, de nombreux systèmes de culture sont mis en essai aussi bien en station qu'en milieu paysan. Notre étude compare quatre systèmes de culture pendant 8 ans ; le système *Mucuna*-maïs (M1) où le *Mucuna*, une légumineuse de couverture, est renouvelé tous les ans ; le système conventionnel de fertilisation minérale (NPK) avec 76 N, 30 P et 30 K ; le système *Mucuna*-maïs où le *Mucuna* est renouvelé tous les deux ans (M2) et le système traditionnel (T) d'agriculture minière où le sol ne reçoit que les restitutions végétales.

Après 8 ans d'essai, le système *Mucuna*-maïs (M1) s'est révélé, en terme de productivité végétale et d'amélioration de certaines propriétés physico-chimiques du sol, une alternative particulièrement intéressante pour la gestion des terres dans le sud Bénin, non seulement par rapport aux systèmes traditionnels (T), mais aussi par rapport aux systèmes plus intensifiés avec fertilisation chimique (NPK). (AZONTONDE et al., 1998).

Globalement, les taux et stocks de C diminuent de la surface vers la profondeur du sol. Et si l'on se réfère aux modes de gestion des sols, le sens de variation des teneurs ou stocks en C organique est le suivant : $M1 > M2 = NPK > T$. Par ailleurs, le rendement en maïs est étroitement corrélé avec C de la couche 0-10 cm ($r = 0,98$) qui peut donc servir, pour ces systèmes d'indicateur de fertilité.

Pour préciser l'effet du *Mucuna* sur le stockage de C et les compartiments organiques responsables des variations de C dans ces sols, une étude spécifique de la matière organique a été faite à partir d'un fractionnement granulométrique du sol. Cette méthode conduit entre autres à la conclusion que ce sont prioritairement les fractions $> 50 \mu\text{m}$ et dans une moindre mesure, la fraction $2-20 \mu\text{m}$. Ce dernier aspect apparaît comme une «nouveau» car généralement les variations des teneurs en C sur cette fraction sont relativement faibles. Ceci résulte peut-être d'un effet spécifique des modes de gestion avec mulch et/ou plantes de couverture.

Les teneurs en azote (N) minéral au cours du cycle cultural dépendent du niveau organique du sol. Par ailleurs, les teneurs d'azote ammoniacal sont 2 à 10 fois plus élevées que celles de N

nitrique. La variation de N est plus sensible en surface qu'en profondeur et l'amplitude de ces variations change suivant les traitements. Mais le sens d'évolution des teneurs en azote minéral varie dans le même sens que l'humidité du sol liée à la pluviométrie. Il suit, indépendamment des traitements, quatre phases bien distinctes faisant ressortir un décalage entre la période de la forte minéralisation (flush) et celle où les besoins en azote sont grands (floraison-épiaison du maïs).

Le système *Mucuna*-maïs (M1) fournit au sol par rapport aux autres traitements, les taux d'azote les plus élevés ; cet effet se manifeste également sur le flush de minéralisation confirmant ainsi la fixation de N₂ (NFix) élevée par le *Mucuna* (fixations libre et symbiotique).

La vitesse de minéralisation dépend peu de l'azote total et du potentiel de minéralisation. Les traitements NPK, M2 et M1 fournissent des valeurs très similaires de potentielle de minéralisation (41-43 mg kg⁻¹ sol). Par contre, celle du témoin est nettement plus basse (10,5 mg kg⁻¹ sol). De plus ce système, après 8 ans de pratique, a conduit à un bilan en N qui indique que toutes les pratiques culturales mises en oeuvre occasionnent des pertes en N. Mais dans la pratique traditionnelle T, les pertes épuisent le sol tandis que les autres systèmes (M1, M2, NPK), la perte est due à l'abondance de N.

Ce système (M1) constitue donc une alternative à la fumure minérale azotée et une pratique adaptée à la restauration des sols ferrallitiques du sud-Bénin.

SUMMARY

Because of intense and prolonged cultivation, soils of Benin have been submitted to degradation for decades. This degradation affected particularly the sandy and sandy clay ferrallitic soils ("terres de barre") in the southern part of Benin. This in turn, led to a constant decrease in crop yields and threatened the food self sufficiency. In order to restore these degraded soils, many cropping systems have been assayed in experimental stations and fields. Our study compares four treatments which have been conducted over eight years : a *Mucuna*-maize system (M1), in which *Mucuna* a leguminous cover was sown every year ; a conventional farming system using inorganic fertilization (NPK); a *Mucuna*-maize system (M2), in which *Mucuna* was sown every two years; and the traditional (T) farming system in which soil received only plant restitutions.

After a eight-year test, the *Mucuna*-maize treatment (M1) appeared -in terms of plant productivity and management of soil physical and chemical properties-, as an interesting alternative for land management when compared to the traditional farming system (T) and the intensified farming system (NPK). The soil organic C contents then varied in the following order: M1 > M2 = NPK > T, the maize yields being strongly correlated with the C content at a 0-10 cm depth. C could thus be considered as a soil fertility indicator. A study of soil organic matter by particle-size fractionation was then undergone, in order to specify the effect of *Mucuna* on the C stock and the organic compartments responsible for C variations in these soils. This method showed that fractions 2-20 μm and > 50 μm were responsible for such variations. The inorganic N contents during plant cultivation depended on the soil organic level. The variations of soil inorganic N contents followed different phases, with a gap in between the high mineralization period (N flush) and the period of high N needs. When compared to the other systems, the *Mucuna*-maize treatment (M1) provided higher soil N contents and higher N flush. After the eight-year experiment, losses of N occurred whatever the cropping system, with a degradation of the soil in the traditional farming system (T). The *Mucuna*-maize farming system (M1) provides thus an alternative to the inorganic N fertilization and can lead to a better management of ferrallitic soils in southern Benin.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	I
RESUME.....	VII
SOMMAIRE.....	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIERE PARTIE.....	9
CHAPITRE I : MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN.....	11
CHAPITRE II : LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL, LA PRESENTATION DU <i>MUCUNA UTILIS</i> ET DES SOLS ETUDIES.....	23
DEUXIEME PARTIE : INFLUENCE DU SYSTEME <i>MUCUNA</i>-MAÏS SUR LA PRODUCTION, LES NIVEAUX DE RESTITUTION ET LES PROPRIETES DU SOL.....	43
CHAPITRE III : INFLUENCE DU SYSTEME <i>MUCUNA</i>-MAÏS SUR LA PRODUCTION EN MAÏS ET LES RESTITUTIONS AU SOL.....	45
METHODOLOGIE.....	45
RESULTATS.....	47
DISCUSSION.....	57
CONCLUSION.....	63
QUELQUES ASPECTS ECONOMIQUES DE LA MISE EN VALEUR DU SYSTEME <i>MUCUNA</i> -MAÏS.....	65
CHAPITRE IV : INFLUENCE DU SYSTEME <i>MUCUNA</i>-MAÏS SUR LES PROPRIETES DU SOL.....	71
METHODOLOGIE.....	71
RESULTATS.....	73
DISCUSSION.....	87
CONCLUSION.....	89
TROISIEME PARTIE : INFLUENCE DU SYSTEME MAÏS-<i>MUCUNA</i> SUR LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE ET DE L'AZOTE.....	93
CHAPITRE V : EFFET DU SYSTEME <i>MUCUNA</i>-MAÏS SUR LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE.....	95
MATERIEL ET METHODE.....	95
RESULTATS.....	103
DISCUSSION.....	119
CONCLUSION.....	125
CHAPITRE VI : EFFETS DU SYSTEME <i>MUCUNA</i>-MAÏS SUR LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE.....	129
1-DYNAMIQUE DE L'AZOTE MINERAL ET EVALUATION DE L'AZOTE POTENTIELLEMENT MINERALISABLE.....	129
2- INFLUENCE DU SYSTEME <i>MUCUNA</i> -MAÏS SUR LE BILAN DE L'AZOTE DANS LE SYSTEME DANS LE SYSTEME SOL PLANTES.....	153
3- CONCLUSION.....	167
CONCLUSION GENERALE.....	171
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	183
ANNEXES.....	219

INTRODUCTION GENERALE

Dès l'avènement des indépendances et au regard des nombreuses ressources dont dispose le Bénin, les hommes ont cru en un développement rapide et soutenu de ce pays de l'Afrique de l'Ouest. Malheureusement, ce développement n'a été ni rapide ni soutenu et le Bénin doit faire face aujourd'hui à de nombreux problèmes dont la dégradation des sols et en particulier des sols ferrallitiques du sud-Bénin communément appelés "terres de barre". Le problème du maintien de la fertilité de ces sols se pose dès leur mise en culture.

Le système cultural basé sur la rotation culture/jachère de longue durée permettait traditionnellement de gérer la fertilité de ces sols. Après déforestation et brûlis, le sol était cultivé avec mise à feu des résidus de récolte pendant quelques années avant d'être abandonné pour une période de jachère suffisamment longue (environ 10 ans) pouvant permettre la restauration de sa fertilité. Cet agrosystème pratiqué par les paysans africains produisait assez pour satisfaire les besoins des populations sans endommager l'environnement. Toutefois ce système demandait d'assez grandes étendues de terre pour répondre aux besoins d'une faible population. Mais depuis les trois dernières décennies, ce système n'est plus à l'équilibre sous l'effet d'une rapide croissance démographique. A cette forte augmentation de la population se sont ajoutées des contraintes d'ordre climatique et socio-économique.

C'est le cas, en particulier des terres de barre du sud-Bénin qui ne représentent que 7% de la superficie totale du pays mais concentrent plus de 30% de la population nationale avec des densités de l'ordre de 300 à 400 habitants/km² contre une moyenne nationale de 45 habitants/km². Les principales cultures pratiquées dans cette partie méridionale du pays sont, le manioc, le niébé, l'arachide, le palmier à huile, le coton et le maïs. Ce dernier constitue la base de l'alimentation. Pour ces cultures, sur d'importantes étendues de terre (60 à 80% des terres de barre), on peut observer des phénomènes d'érosion par suite de la forte réduction de couverture des sols et de la dégradation de la structure.

La baisse de la fertilité chimique de ces sols et la dégradation de la structure sont généralement attribuées à la diminution des teneurs en matière organique dont les variations sont sous la dépendance de nombreux facteurs écologiques (sol, climat) et agronomiques (pratiques culturales et les systèmes de culture) (DJEGUI, 1992).

Cette situation s'aggravant d'année en année, le Bénin a entrepris des activités de conservation des sols dès les années 1964. Si celles-ci se sont avérées efficaces pour la conservation de la ressource sol, elles n'ont pas été accompagnées de fortes augmentations des rendements. D'où la nécessité de mettre en place d'autres modes de gestion des sols. Ces solutions existent heureusement. Certains relèvent de systèmes d'utilisation des terres qui maintiennent au sol

une couverture végétale permanente, protègent le sol de l'érosion hydrique et éolienne et accroissent sa fertilité. Par ailleurs, les paysans utilisent pour des raisons socio-économiques peu ou pas d'engrais minéraux. C'est la matière organique du sol qui doit assurer les réserves en éléments nutritifs. Cette fonction centrale de la matière organique comme indicateur d'évolution et comme facteur de fertilité physique et chimique est confirmée par les travaux de TRAN VIN et al., (1978), WERTZ (1979) et DJEGUI (1992). Ils ont montré que la fertilité de ces sols passe nécessairement par la reconstitution de leur stock organique.

AZONTONDE (1993 et 1998) propose pour une productivité durable du maïs et l'amélioration du niveau du stock organique et azoté, un système d'association du maïs à une légumineuse de couverture, le *Mucuna pruriens*. Ce système se définit par l'intégration dans la succession des cultures, d'une végétation installée ou maintenue par l'agriculteur dans le but de couvrir le sol pendant tout ou une partie de l'année sans empêcher une culture annuelle. La présence d'une couverture végétale du sol, réduit les pertes en terre (LAL, 1996), permet une meilleure utilisation de l'eau disponible (AKOBUNDU, 1993) et assure le contrôle des mauvaises herbes et de l'érosion. D'après une étude de BUCKLES (1995), s'y ajoute l'effet fertilisant au moins aussi important que la conservation de l'eau et des sols. Ainsi, au Costa-Rica, une rotation de type *Mucuna*-maïs conduit en 10 ans à une augmentation graduelle de la teneur en matière organique dans les dix premiers centimètres du sol (TRIOMPHE, 1996). Le *Mucuna* existe au Bénin sous forme sauvage avec des feuilles veloutées et très urticantes. L'espèce "*utilis*" introduite en 1988 a été rapidement adoptée par la majorité des paysans du sud-Bénin, et des résultats préliminaires en station (AZONTONDE, 1993) montrent que ce système permet une augmentation notable du stock organique des horizons de surface. Ainsi les objectifs de ce travail sont d'étudier, dans les conditions pédoclimatiques du sud-Bénin, pour le système *Mucuna*-maïs sur terres de barre :

- l'effet du *Mucuna* sur la production en maïs,
- l'effet du système *Mucuna*-maïs sur les restitutions organiques et minérales au sol ainsi que sur les modifications des caractéristiques physiques et chimiques du sol, les formes et la dynamique du stockage de carbone (C) et d'azote (N) dans le sol à partir d'un fractionnement granulométrique du sol, la minéralisation de l'azote et sa disponibilité pour la plante.

Ce mémoire est organisé en trois parties et six chapitres :

- la première partie (chapitres 1 et 2) présente le milieu physique et humain du sud-Bénin (chapitre 1) ; puis le dispositif expérimental et les sols étudiés (chapitre 2) ;

- la deuxième partie est consacrée à la production végétale, aux niveaux des restitutions organiques et minérales (chapitre 3), et aux variations des stocks et de quelques propriétés générales des sols qui en résultent, ainsi qu'aux aspects socio-économiques de ce système (chapitre 4),

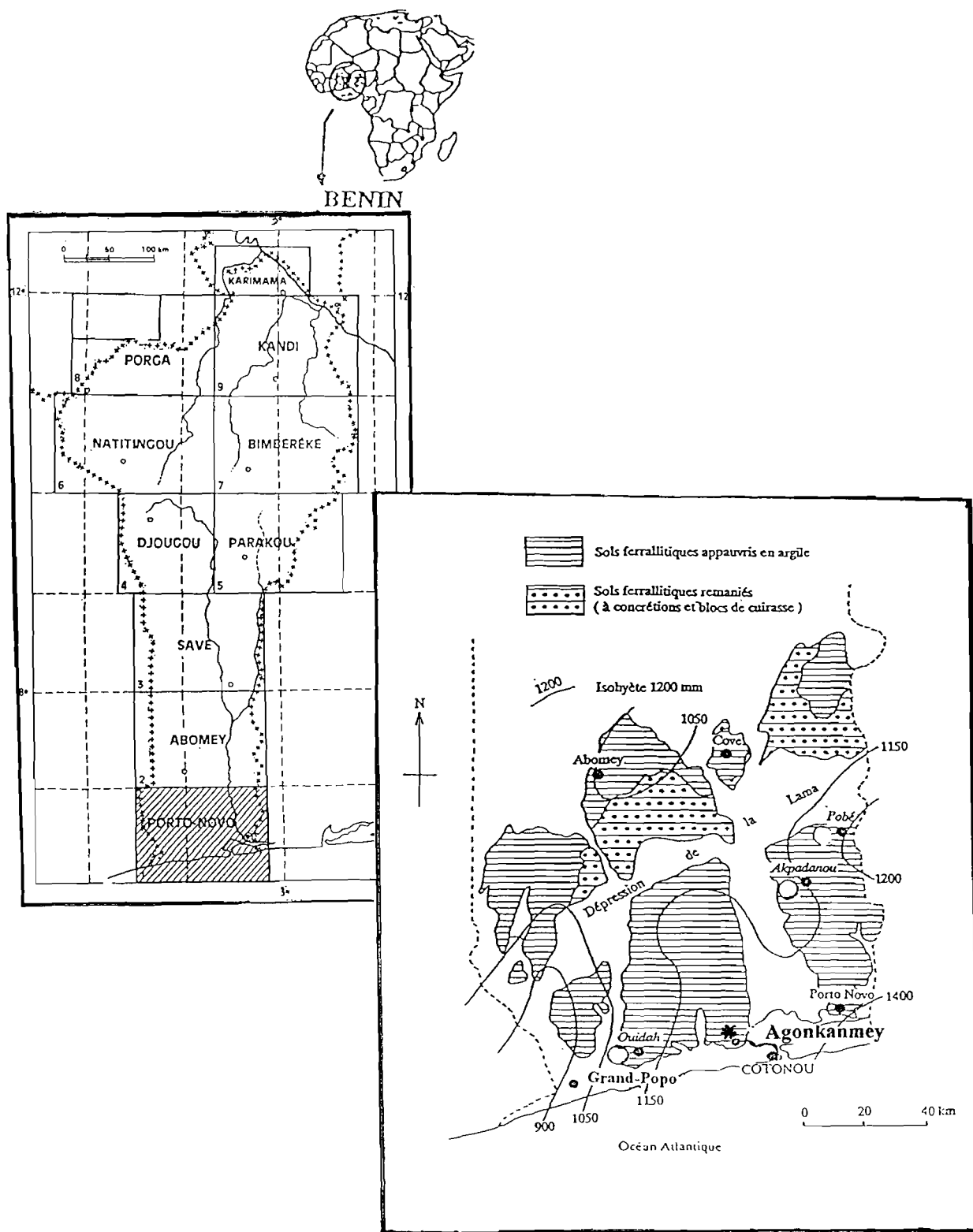
-la troisième partie étudie l'effet du système *Mucuna*-maïs sur les formes et la dynamique des MO (C,N) stockées (chapitres 5) et sur la dynamique et le bilan de l'azote dans les sols (chapitre 6).

Une synthèse des résultats à différents niveaux (parcelles expérimentales et en laboratoire) permet de tirer des enseignements et recommandations, conséquences pour la gestion durable des agrosystèmes au Bénin ainsi que les perspectives de recherche sur la dynamique et les biogéocycles du carbone et de l'azote en milieu soudano-guinéen du sud-Bénin.

PREMIERE PARTIE

- Chapitre 1 : le milieu physique et humain
- Chapitre 2 : le dispositif expérimental, la présentation de *Mucuna pruriens utilis* et les sols étudiés.

Figure I.1 : Localisation de la zone d'étude



*Agonkanmey : Zone d'étude

CHAPITRE I

LE MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN

L'objet de ce chapitre est de présenter quelques aspects de l'environnement biophysique, le mode d'occupation des terres du sud-Bénin ainsi que la localisation de la station de recherche d'Agonkanmey où se sont déroulées les recherches.

1. SITUATION DE LA STATION DE RECHERCHE D'AGONKANMEY

Le sud Bénin compris entre le littoral (à Cotonou) et le 8^e degré de latitude nord, comporte 4 des 6 départements du pays. La présente étude a été menée à proximité du village d'Agonkanmey au sein de la station de recherche du Centre National d'Agro-Pédologie (CENAP) situé à environ 10 km au nord-ouest de Cotonou dans le Département de l'Atlantique (fig.I.1).

2. LE CLIMAT

Le climat dans cette zone méridionale du Bénin est de type subéquatorial maritime caractérisé par l'alternance de deux saisons sèches (novembre à mars et juillet à août) et de deux saisons des pluies (mars à juillet et septembre à novembre).

La pluviométrie moyenne annuelle croît le long de la côte de l'ouest vers l'Est et oscille entre 850 mm (Grand-Popo) et 1400 mm (Porto-Novo). A l'ouest, elle croît vers le nord (800 à 1200 mm), tandis qu'à l'est, elle décroît vers le nord (1400 à 1200 mm).

La moyenne annuelle à Agonkanmey est de 1200 mm mais les variations annuelles sont assez élevées (700 à 1800 mm) (Fig. I.2). Les années de déficit (< 1000 mm) sont plus fréquentes

Figure I.2 : Moyennes pluviométriques annuelles de la station d'Agonkanmey (1976-1997)

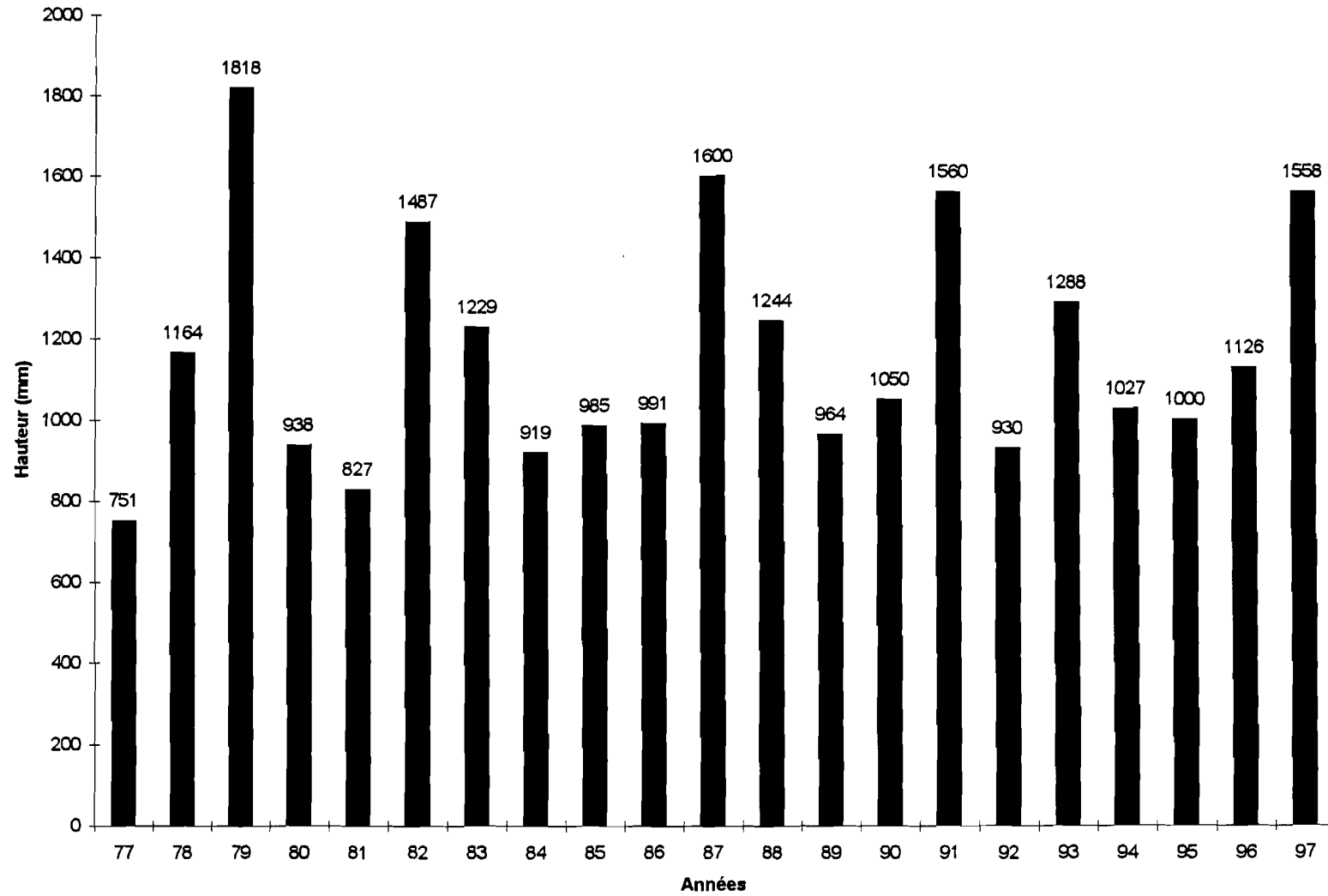
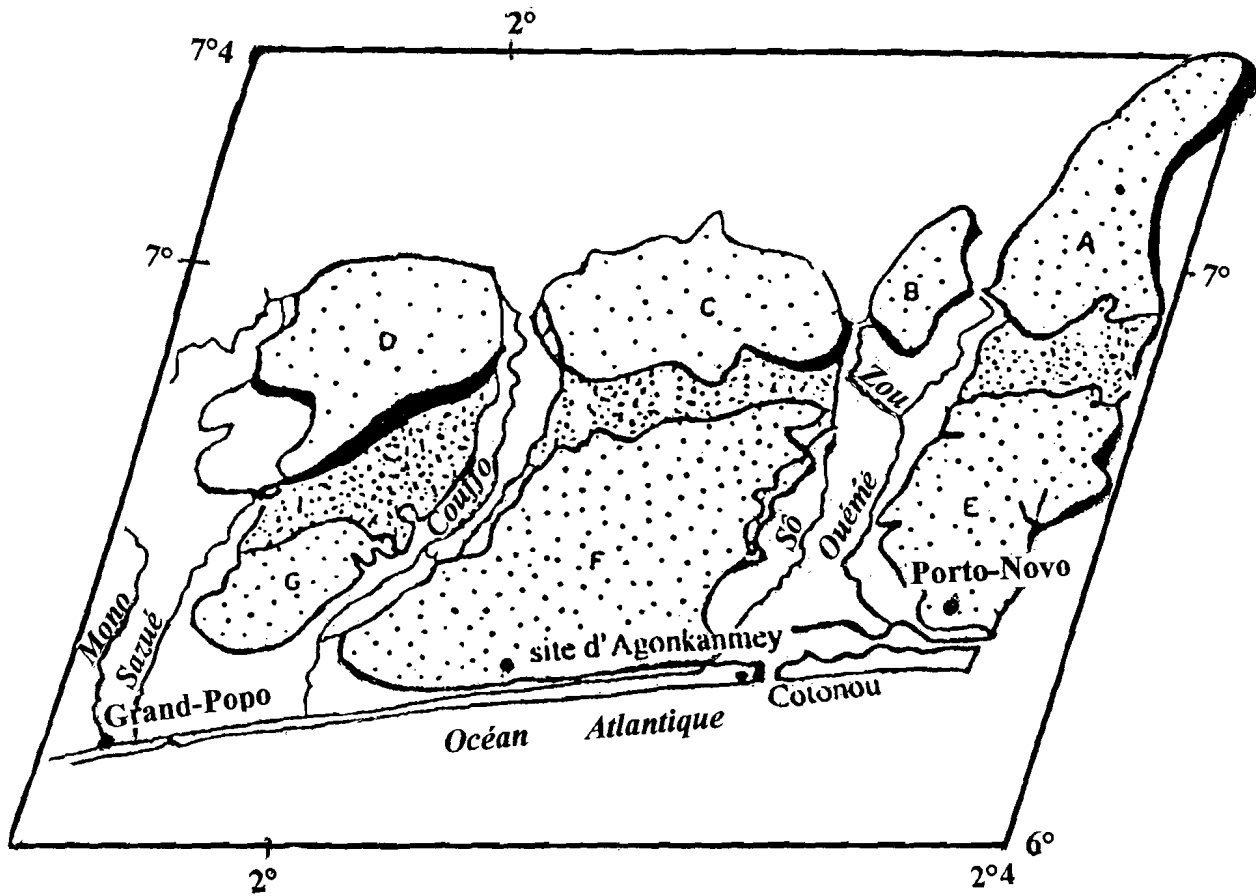


Figure I.3 : Schéma morphologique du Sud-Benin.



D'après SLANSKY (1959)

LEGENDE :



Les formations du Continental Terminal

- A : plateau de Ketou (117 m)
- B : plateau de Zagnanado (90 m)
- C : plateau d'Abomey (245 m)
- D : plateau d'Aplahoue (153 m)
- E : plateau de Sakete (58 m)
- F : plateau d'Allada (90 m)
- G : plateau de Bopa



La depression de la Lama

que celles d'excès pluviométrique (> 1200 mm). Douze années sur 21 soit 67 % présentent une pluviométrie comprise entre 750 et 1000 mm tandis que huit années seulement sur 21 soit 38 % ont une pluviométrie supérieure à 1200 mm. De 1977 à 1997, l'apparition des pics pluviométriques semble obéir à une fréquence de 3 à 4 ans depuis 1977. La répartition pluviométrique au sud-Bénin autorise une période de croissance végétative (PCV) de 240 jours par an. Les pluies du début de saison pluvieuse sont très agressives ; mais les intensités instantanées n'atteignent qu'assez rarement 100 mm h^{-1} .

La moyenne annuelle de température est de 27°C . La moyenne mensuelle des minima enregistrée en juillet ou août varie entre 20 et 23°C , tandis que celle des maxima est de l'ordre $32-34^{\circ}\text{C}$. L'évapotranspiration potentielle (ETP Penman) moyenne annuelle varie entre 1300 et 1500 mm.

L'hygrométrie de l'air reste élevée (70 à 90%) toute l'année.

3. LA VEGETATION

La formation végétale climacique est un fourré arbustif (LAMOUROUX, 1957). C'est une formation très dense, non stratifiée à tapis herbacé inexistant. Elle peut être dominée par endroits par quelques grands arbres (arbres fétiches), tels que le Fromager (*Ceiba pentandra*) dans les secteurs les plus humides, le Baobab (*Adansonia digitata*) dans les secteurs les plus secs. La composition floristique de cette formation est assez constante. Les deux espèces les plus fréquemment rencontrées semblent être le *Psidium goyava* et le *Bridelia ferruginea*.

Compte-tenu de la très forte densité de population (300 à 400 habitants/km²), ce recru arbustif n'existe plus que sur des petites surfaces et souvent sous forme dégradée. Les aires de cultures dominant et l'on rencontre des cultures annuelles (maïs, haricot, manioc, arachide, patate douce et autres) et des cultures pérennes comme le palmier à huile (*Elaeis guineensis*).

Les espèces végétales dominantes qui colonisent les aires d'essais dans leur état actuel sont les suivantes :

Sur la parcelle témoin (T) de l'essai :

- *Perotis indica* et *Odonlantia corymbosa* qui sont des espèces acidophiles.

Sur les autres parcelles (M1, M2 et NPK) de l'essai :

- *Celosia trigyna*, *Digitaria horizontalis* et *Rottboellia cochinchinensis* qui caractérisent les sols dont le niveau de fertilité est moyen.

4. MODELE ET HYDROGRAPHIE

Le paysage se caractérise par l'existence de deux séries de plateaux séparés dans le sens SW-NE par une large dépression, la Lama, et dans le sens NS par quelques vallées principales : Mono, Couffo et Ouémé (Fig I.1). Les plateaux sont parcourus de petites vallées très encaissées, sèches pour la plupart pendant la grande saison sèche et des lagunes en voie de comblement.

5. GEOLOGIE

Les formations géologiques rencontrées sont d'origine sédimentaire (VOLKOFF, 1970) ; on distingue :

- des formations du Paléocène et de l'Eocène généralement de nature argileuse qui tapissent le fond de la dépression de la Lama.
- des formations du Continental Terminal d'âge Miopliocène, qui occupent les plateaux (Fig.I.3). Elles ne laissent apparaître que leur «terme supérieur» constitué de matériaux meubles argilo-sableux, surmontant des niveaux de galets roulés fréquemment visibles en bordure de plateaux. D'après SLANSKY (1959), il s'agirait d'un épandage qui a recouvert toute la région sur une épaisseur de quelques mètres à quelques centaines de mètres probablement à la fin du tertiaire. Cet épandage s'est effectué en milieu continental : il est constitué de matériau ayant déjà subi une altération ferrallitique sur une grande épaisseur (MILLETTE et al., 1965).

La mise en place des sols de terres de barre est liée à celle de ce matériau.

- des formations alluviales généralement de nature argileuse ou argilo-limoneuse, qui prennent de l'importance dans les basses vallées du Mono et de l'Ouémé.
- des formations littorales constituées d'une série de cordons sableux, sensiblement parallèles à la côte actuelle, entre lesquels s'étirent de petites dépressions où alternent lagunes et marécages.

6. SOLS

Ils ont été décrits par VOLKOFF (1976) et VOLKOFF et WILLAIME (1976).

Les différentes unités de sols du sud-Bénin s'organisent en fonction du modèle :

- **Les sols peu évolués.** Ils sont localisés sur le cordon littoral actuel et ne s'étirent que sur une mince frange côtière dont la largeur n'excède jamais plus de 1,5 km. Ils occupent moins de 1% de la superficie du pays et 4% de la surface totale du sud-Bénin.

- **Les vertisols** du bassin sédimentaire côtier tapissent le fond de la dépression de la Lama. Ils forment une bande orientée SW-NE et représentent environ 2% de la superficie totale du pays et 10% de la surface du sud-Bénin.

- **Les sols hydromorphes** sont développés dans les vallées entre les plateaux, ils occupent 5% du pays et 25% de la superficie du sud-Bénin.

- **Les sols ferrallitiques** se sont développés sur le grès du Crétacé et en bordure des sept plateaux du Continental Terminal, ainsi que sur les versants pentus de la majeure partie des petites vallées qui les entaillent. Ces sols sont appelés 'terres de barre'. Ils représentent 7% de la superficie totale du pays et 60% de la surface du sud-Bénin. Ce sont les sols les plus exploités dans le pays.

7. MILIEU HUMAIN ET OCCUPATION DES SOLS

La densité de population est très élevée et varie entre 300 et 400 habitants/km². La conséquence directe est la réduction de la taille des exploitations, la durée des jachères et la surexploitation du milieu. L'érosion s'accélère et on aboutit à une forte dégradation des sols.

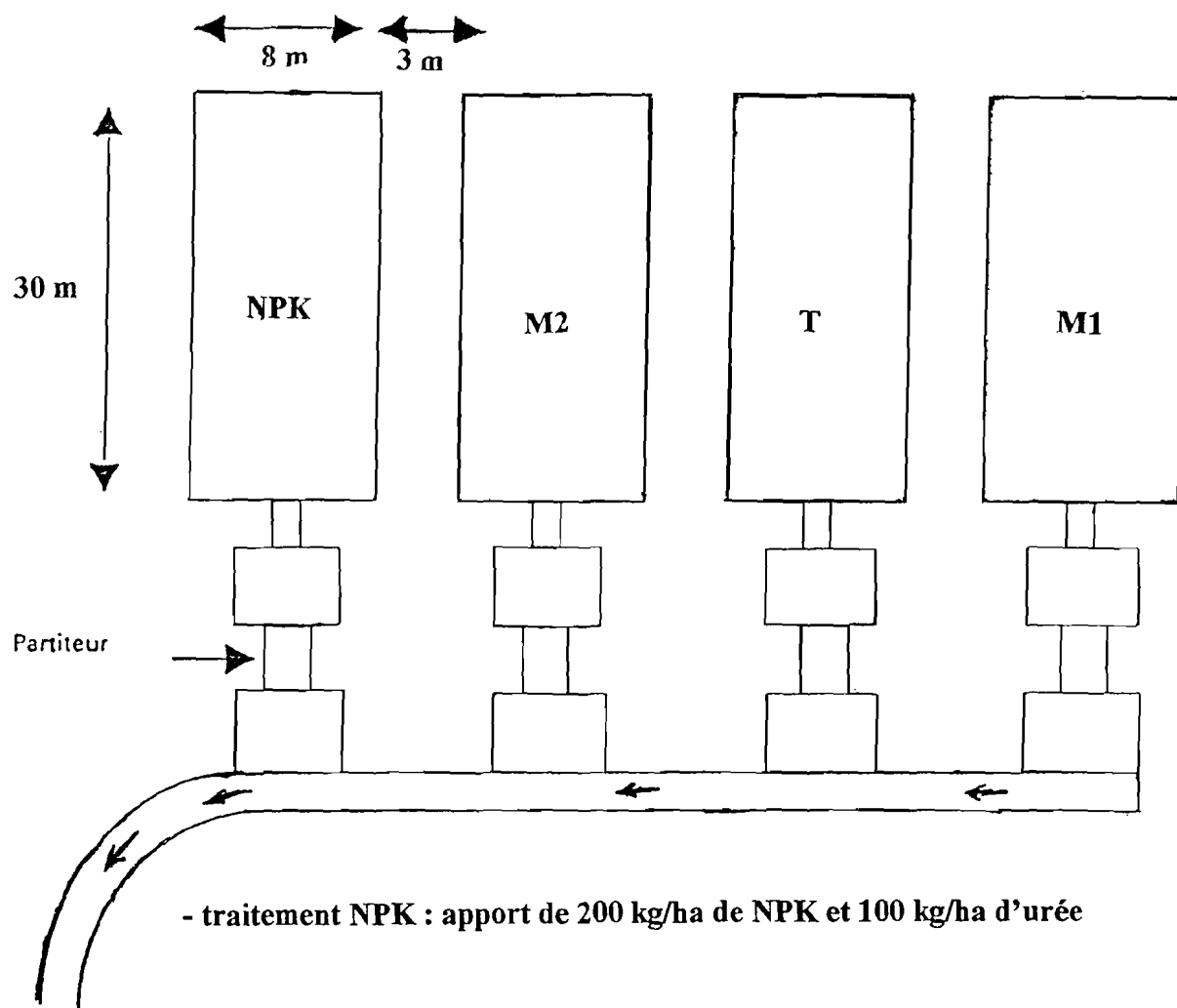
Ce sont sur les terres de barre qu'est localisé le dispositif expérimental de notre étude.

En résumé, le milieu physique se caractérise par :

- un climat chaud et semi-humide avec une pluviométrie assez variable d'une année à l'autre et irrégulièrement répartie à l'intérieur d'une même année au sud-Bénin ;
- un modelé faiblement ondulé dont les unités de paysage sont constituées de plateaux avec des sols bien drainés mais actuellement à un niveau avancé de dégradation, et de vallées hydromorphes ;
- deux saisons de culture (pluies) peuvent y être pratiquées ; la première, la plus utilisée, dispose d'une pluviométrie suffisante pour toutes les cultures annuelles de la zone, tandis que la deuxième est plus limitante pour les cultures fortes consommatrices d'eau.

Le chapitre suivant présentera le dispositif expérimental, les caractéristiques du *Mucuna* et des sols étudiés.

Figure II.1 : Plan des parcelles expérimentales



- traitement NPK : apport de 200 kg/ha de NPK et 100 kg/ha d'urée

- traitement M2 : association Mucuna-maïs avec renouvellement du maïs tous les ans et du Mucuna tous les deux ans

- traitement témoin T : culture traditionnelle continue de maïs, sans Mucuna ni fumure minérale

- traitement M1 : association Mucuna-maïs renouvelée tous les ans

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL, TRAITEMENTS ET SOLS ETUDIÉS

1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1.1- Historique et caractéristiques des parcelles étudiées

Le dispositif est constitué de quatre parcelles de forme rectangulaire de 30 m sur 8, de pente 4%, délimitées par des tôles de fer larges de 30 cm enfoncées dans le sol sur une profondeur de 10 cm. Une allée de 3 m de large sépare les parcelles les unes des autres (Fig II.1).

Les parcelles ont été installées en 1964 pour quantifier l'érosion et le ruissellement. L'histoire de ces parcelles est présentée au tableau II.1 ;

- de 1964 à 1965, les parcelles P1, P2 et P3 ont été soumises à une succession jachère-sol nu sans culture. Les années suivantes (1965-1974), ces parcelles ont été semées en maïs ou en arachide sur butte ou billons, avec ou sans labour. Deux sarclages ont été faits au cours du cycle du maïs. La 4^{ème} parcelle (P4) déjà surexploitée, a été mise en jachère pendant 10 ans avant d'être intégrée dans l'essais ;

- de 1975 à 1988, l'objectif était d'étudier non seulement l'érosion et le ruissellement mais également l'évolution du rendement en maïs et des taux de matière organique des sols. (AZONTONDE, 1993). Les traitements appliqués sur les quatre parcelles d'essais sont les suivants :

T1 sur la parcelle P1 : sarclage léger à la houe, apport de fumier,

B sur la parcelle P2 : sarclage léger à la houe, enfouissement de *Stylosanthes*,

C sur la parcelle P3 : andainage des résidus de récolte, pas d'enfouissement,

A sur la parcelle P4 : billonnage isohypse avec enfouissement à la houe + 2 sarclages.

Tableau II.1: Traitements effectués sur les parcelles de 1964 à 1996

Parcelles	Dates		
	1964 - 1974 *	1975-1988	1989-1996
P1	buttes (2 ans) puis billons + 2 sarclages culture : maïs	Sarclage léger à la houe apport du fumier culture : maïs	NPK : fertilisation NPK (15-15-15 ; 200 kg ha ⁻¹) + 100kg ha ⁻¹ urée soit : 76 kg N ha ⁻¹ , 30 kg P ha ⁻¹ et 30 kg K ha ⁻¹ sarclage superficiel avec enfouissement des pailles culture : maïs tous les ans
P2	labour à la houe à plat et 2 sarclages culture : maïs	sarclage léger à la houe enfouissement Stylosanthès culture : maïs	M2 : Mucuna semé tous les 2 ans sarclage superficiel avec enfouissement des pailles tous les 2ans culture : maïs tous les ans
P3	sans labour culture : maïs	andainage résidus récolte 2 sarclages culture : maïs	T : sarclage superficiel avec enfouissement des pailles culture : maïs tous les ans
P4	jachère naturelle : 10 ans	billonnage isohypse culture : maïs tous les ans	M1 : Mucuna ressemé tous les ans sarclage superficiel sans enfouissement de pailles culture : maïs tous les ans

* les traitements sur les parcelles P1 à P3 ont été précédés d'un an (64) de jachère et d'un an de sol nu sans culture

En général, ces traitements ont contribué à arrêter l'érosion, mais n'ont pas conduit à une amélioration des rendements. Quelques caractéristiques physico-chimiques des sols à la fin de ces essais (1988) sont consignées dans le tableau II.2.

A partir de 1989, l'essai actuel a été installé. Il met en expérimentation une nouvelle technique qui consiste à cultiver une légumineuse de couverture, le *Mucuna pruriens utilis*, sous forme d'une courte jachère de 7 à 8 mois décalée par rapport au cycle du maïs.

2. TRAITEMENTS

Les traitements décrits ci-dessous sont consignés dans le tableau II.1.

La parcelle P3 qui doit recevoir le traitement T, ayant été légèrement incurvée au cours des précédents essais, une homogénéisation a été réalisée par un apport de terre de la partie amont vers le centre de la parcelle afin d'homogénéiser le sol et rendre la pente rectiligne avant les prélèvements du début des essais en 1988.

- Traitement témoin T : culture traditionnelle continue de maïs sans *Mucuna* ni fumure minérale, résidus de récolte laissés à la surface du sol.
- Traitement NPK : culture continue du maïs avec apport de 200 kg ha⁻¹ de NPK et 100 kg ha⁻¹ d'urée, soit au total à l'hectare, 76 kg N, 30 kg P et 30 kg K, pailles de maïs laissées en mulch sur le sol
- Traitement M2 : association *Mucuna*-maïs avec renouvellement du maïs tous les ans et du *Mucuna* tous les deux ans, pas de fertilisation minérale, pailles de maïs et litière de *Mucuna* laissées en mulch sur le sol.
- traitement M1 : association *Mucuna*-maïs renouvelée tous les ans, pas de fertilisation minérale, pailles de maïs et litière *Mucuna* laissées en mulch sur le sol.

Les semis de maïs sont réalisés après une pluie supérieure à 15 mm, généralement entre le 15 avril et le 15 mai. Le maïs est semé à une densité de 31.000 pieds ha⁻¹ (40 cm sur ligne et 80 entre ligne avec 2 grains par poquet). La récolte se fait entre le 30 juillet et le 30 août. La variété de maïs utilisée, le DMR, est un hybride variétal, issu du croisement d'une variété nigériane avec une variété locale. C'est un maïs de 100 à 110 jours.

Le sol n'est pas labouré mais subit un travail superficiel. Ce travail est effectué à la houe au début de la grande saison des pluies ; ensuite, un sarclage superficiel est effectué toutes les

Tableau II.2 : Quelques caractéristiques physiques et chimiques du sol (profil moyen) au début de l'essai en 1988.

Profondeurs (cm)	0-10	10-25	25-38	38-74	74-15
Granulométrie					
(%)					
0-2μ	12,67	21,48	48,72	51,64	52,61
2-20μ	3,61	1,01	2,03	1,02	2,02
20-50μ	2,85	4,07	trace	1,01	trace
50-200μ	19,77	15,94	13,14	12,93	14,21
200-2000μ	59,72	57,50	36,11	33,40	31,16
MO %					
C	0,56	0,40	0,15	0,08	0,06
N	0,045	0,034	0,017	0,021	0,02
C/N	12,4	11,8	8,8	3,8	3,0
pHeau	5,2	5,1	4,5	4,4	4,4
Complexe d'échange					
cmol kg⁻¹					
Ca	0,83	0,80	0,60	0,61	0,5
Mg	0,43	0,40	0,35	0,36	0,30
K	0,06	0,05	0,16	0,15	0,14
Na	0,08	0,07	0,10	0,08	0,08
S	1,40	1,32	1,21	1,20	1,05
CEC	3,61	3,40	3,46	3,80	3,14
100S/CEC	38	39	35	31	33
Densité apparente	1,40	1,46	1,53	1,56	1,55

deux semaines si les pluies sont fréquentes et régulières sur une profondeur de 5 cm environ. Les résidus de récolte de maïs sont laissés à la surface du sol et le paillis du *Mucuna* est perturbé le moins possible.

L'engrais minéral NPK (15-15-15) est fractionné en deux apports de 100 kg chacun, 15 et 45 jours après le semis du maïs. L'urée est apportée 30 jours après le semis.

3. HISTORIQUE ET CARACTERISTIQUES DU *MUCUNA*

pruriens utilis

Le genre *Mucuna* ou *Stilozobium*, originaire d'Asie (région Indochine-Indonésie) comporterait environ 150 espèces réparties dans les régions tropicales (Allen et Allen, 1981). La taxonomie des principales espèces cultivées telles que : "velvetbean", "Bengal velvetbean", "haricot du Bengale", "pois mascate" "pois du Bengale" ou "frijol terciopelo" est souvent confuse (LEGER-CRESSON, 1989). DUKE, 1981 cité par LEGER-CRESSON (1989) désigne sous l'appellation '*Mucuna pruriens*' tous les types cultivés. Il regroupe les principales formes cultivées en 5 épithètes qui sont : *nivea*, *hassjoo*, *aterrima* ou *mauritus*, *utilis* et *deeringiana*. Il a été introduit aux Etats-Unis depuis le début du 19^e siècle où il était utilisé en association en fourrage pour les mules des bananeraies. Il existe en Amérique centrale depuis 1920. Au sud du Mexique et au Guatemala, les agriculteurs ont remarqué son intérêt pour lutter contre les adventices et améliorer les rendements de maïs (BUCLES, 1995). Il a été introduit au Nord du Honduras dans les années 1980 où il est adopté par 10% des petits agriculteurs de la côte atlantique (TRIOMPHE, 1996).

C'est une plante annuelle volubile et vigoureuse, une légumineuse agressive, fixatrice d'azote, produisant des tiges (lianes) de 3 à 18 mètres de long et un feuillage abondant (photos 31-32)

Les feuilles sont grandes avec des folioles amples et ovales. Les fleurs de couleur souvent pourpre, isolées ou groupées par 2 ou 3 sont portées par de longs racèmes pendants. Les gousses ailées avec des côtes longitudinales sont couvertes d'une pubescence plus ou moins irritante. Les graines sont elliptiques de couleur noire ou blanche. Cette légumineuse fait partie de la famille des Fabacées, de la sous-famille des Papillonacées, de la tribu des phaseolées, de la sous-tribu des Glycinées, du genre *Mucuna*, de l'espèce *pruriens* et d'une variété sélectionnée non urticante appelée *utilis*. Son cycle végétatif est adapté aux tropiques humides (en-dessous de 1500 mètres) et supporte bien les stress liés à la pauvreté minérale des sols, à l'acidité et à la sécheresse (BERHAUT, 1976 cité par LEGER-CRESSON, 1989). Il perd une

quantité importante de feuilles avant la maturité et forme une litière que colonisent ses racines superficielles. Son cycle varie de 100 à 300 jours et dure 150 à 200 jours au Bénin. Les graines contiennent une substance toxique (*L-dopa*) pour les insectes et les hommes. Toutefois, la consommation du *Mucuna* est possible après certains traitements spécifiques (OSEI-BONSU et al., 1995) comme substitut du café (Tchad), sous forme solide à faibles doses (Ghana). Le *Mucuna* aurait un effet nématocide sur certaines cultures, mais serait lui-même sensible à certains nématodes.

Il est largement épargné de la compétition des adventices grâce à son agressivité naturelle.

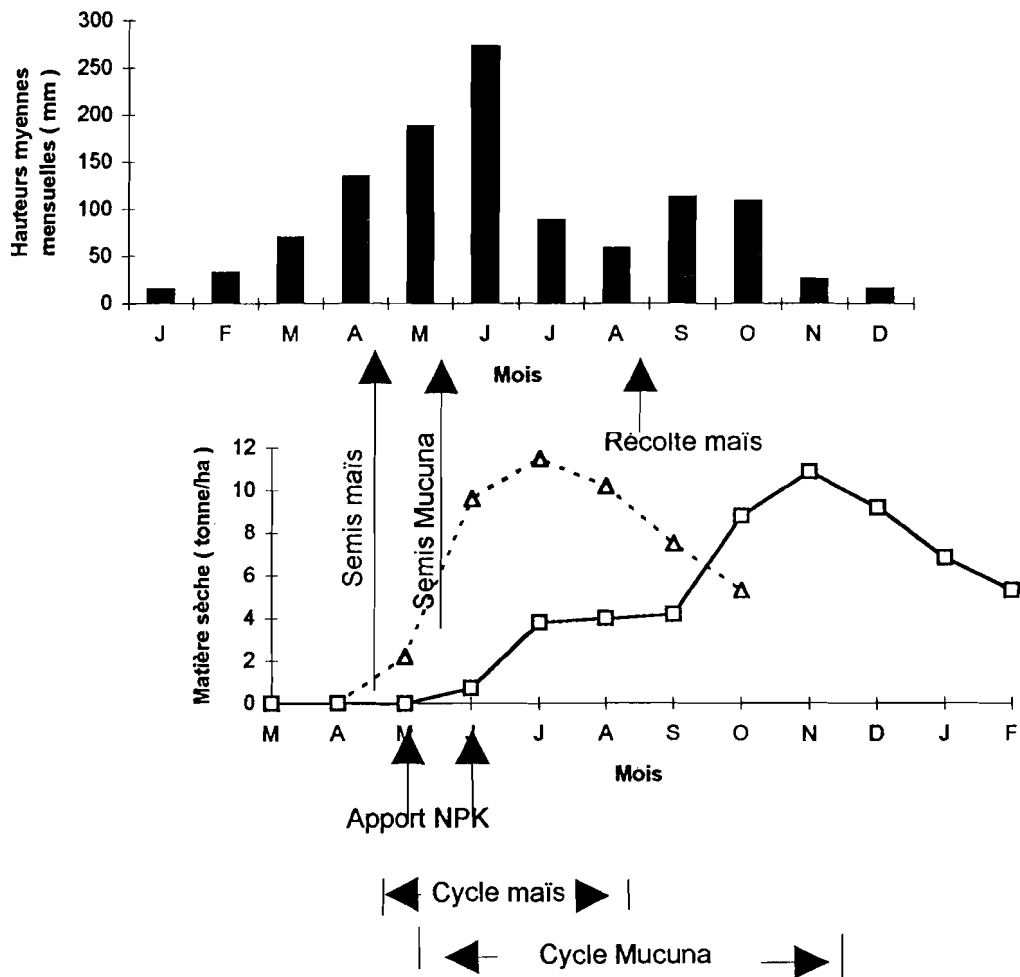
Il est souvent utilisé comme plante de couverture pour éliminer ou réduire les populations d'adventices et surtout celle du chiendent (*Imperata cylindrica*) (KOUKOKPON et al, 1991 ; COULTAS et al., 1996), comme engrais vert pour la restauration des sols (LAL et al, 1978 ; BUCKLES et al, 1996), comme fourrage et comme légume consommé par certaines tribus du sud de l'Inde (RAJYALAKSHMI et al, 1995). La matière sèche fourragère contient en moyenne 10,7% de protéines digestibles et 63,4% de matière digestible totale (LEGER-CRESSON, 1989).

Parmi les inconvénients liés à la culture de cette légumineuse en association-rotation avec le maïs (système *Mucuna*-maïs), il faut mentionner la perte d'un cycle de culture correspondant à la deuxième saison des pluies (la plus petite), puisque le *Mucuna* occupe le terrain pendant cette période. Cette occupation de l'espace est assimilable à une jachère améliorante et non à une culture commerciale, le *Mucuna* n'étant utilisé pour le moment ni comme fourrage pour les animaux, ni comme complément protéinique dans l'alimentation humaine, bien que de nombreux essais soient déjà en cours à ce sujet à la Direction Générale de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB). Il faut toutefois ajouter que la litière de cette plante de couverture réduisant l'évaporation, crée, au niveau du sol, un micro-climat plus frais qui peut attirer les serpents et les rats.

4. CALAGE DES CYCLES MAÏS ET *MUCUNA*

Le système *Mucuna*-maïs est une association - rotation entre le maïs de grande saison des pluies (Avril-Juillet) et le *Mucuna pruriens* variété *utilis*. Le calendrier cultural de cette association - rotation est schématisé sur la figure II.2.

Figure II.2 : Calage des cycles du maïs et du Mucuna
Pluviométrie



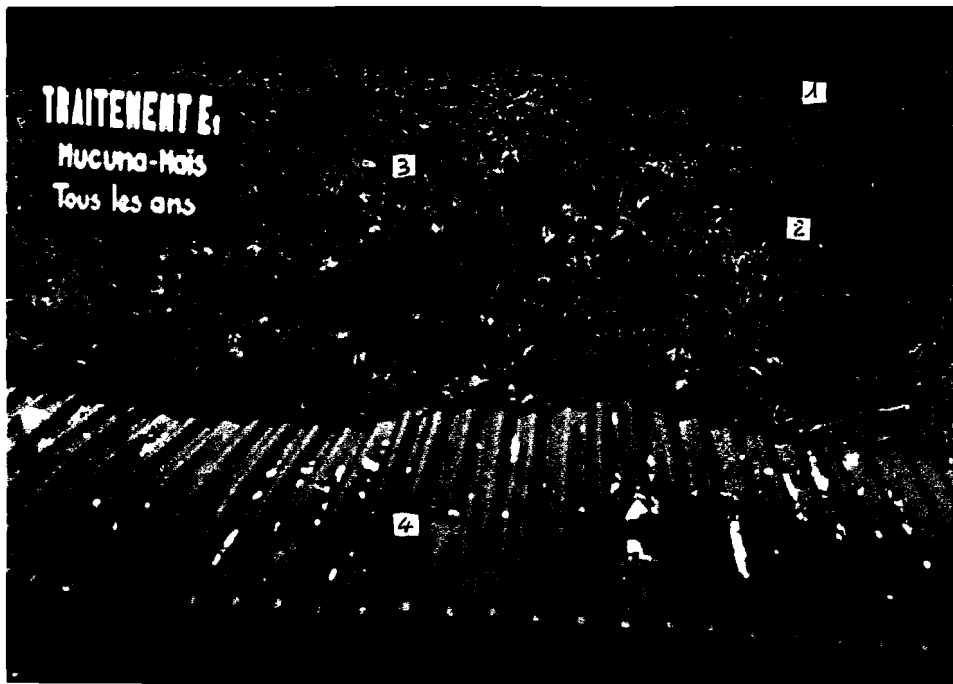


Photo II.1

Parcelle au traitement M_1 ($E_1 = M_1$)
 Très bonne couverture de Mucuna (4mois)
 1 : Graminées, adventices
 2 : bordure de délimitation de la parcelle
 3 : biomasse verte de Mucuna
 4 : couverture de la gouttière en aval de la parcelle
 CENAP Agonkanmey; Octobre 1996.



Photo II.2

Parcelle au traitement M_1 ($E_1 = M_1$)
 Très bonne couverture de Mucuna (6 mois)
 1 : biomasse verte de Mucuna
 2 : litière de Mucuna.
 CENAP Agonkanmey; Décembre 1996.

Après, la préparation du sol, qui consiste à réaliser dès les premières pluies de l'année un sarclage léger limité aux cinq premiers centimètres du sol, le semis du maïs a lieu en Avril à une densité de 80 cm sur 40 à raison de deux graines par poquet.

Celui du *Mucuna* se fait un mois après (mai) entre les lignes du maïs à raison d'une graine par poquet. La récolte du maïs a lieu 3 à 4 mois après le semis (août). Le *Mucuna* se développe alors rapidement, recouvre les autres herbes ainsi que les résidus de maïs et atteint sa pleine croissance en septembre et octobre, il amorce sa sénescence en novembre, se dessèche en décembre, janvier et février. En mars, au moment où démarrent les pluies et les opérations culturales, la couche de paillis n'est plus que de 1 à 2 cm.

5. CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES

Les terres de barre du sud-Bénin

5.1- Généralités

Les terres de barre du sud-Bénin sont des sols ferrallitiques faiblement désaturés (CPCS, 1967 ; VOLKOFF, 1976 ; VOLKOFF et WLLAIME, 1976) qui forment un ensemble très homogène le long du golfe de Guinée, depuis Accra (Ghana) jusqu'au delta du Niger au Nigeria. Ces sols, de couleur rouge à brun rouge, présentent en profondeur (1 à 2 m) des horizons à texture plus argileuse, qui constituent des carrières pour les briques de terre. Ils s'étendent jusqu'à environ 120 km du littoral à l'intérieur du pays. Ils occupent la quasi-totalité des plateaux du sud-Bénin.

Selon WILLAIME (1963) puis MILLETTE et VIEILLEFON (1965), le caractère ferrallitique de ces sols serait surtout hérité des caractéristiques du matériau originel sur lequel se développent sur de grandes épaisseurs, les altérations déjà ferrallitisées des grès du Continental Terminal.

Les sols de terres de barre présentent généralement un horizon superficiel appauvri en argile. FAUCK (1972) attribue l'essentiel de cet appauvrissement à une érosion sélective de la fraction argileuse dans la couche superficielle de certains constituants comme la kaolinite, la silice, des hydroxydes de fer amorphe, l'aluminium non silicaté etc. La couleur rouge de ces sols serait due principalement à la présence du fer sous forme d'hématite.

Tableau II.3 : Moyennes, écarts-types et coefficients de variation de quelques caractéristiques physiques et chimiques de la couche 0-10 cm du sol des parcelles au début de l'essai en 1988.

Traitements	M1			M2			NPK			T		
	Moy.	σ	c.v. %	Moy.	σ	c.v. %	Moy.	σ	c.v. %	Moy.	σ	c.v. %
Granulométrie%												
0-2 μ	12,67	0,57	4,5	14,98	0,67	4,5	11,08	0,59	5,3	14,72	0,13	0,9
2-20 μ	3,61	0,21	5,8	3,86	0,19	4,9	1,87	0,08	4,3	1,35	0,08	5,5
20-50 μ	2,85	0,19	6,7	3,46	0,11	3,2	1,45	0,10	6,9	2,51	0,08	3,2
50-200 μ	19,77	1,33	6,7	23,55	0,86	3,6	25,60	1,00	3,9	21,8	1,06	4,9
200-2000 μ	59,72	2,46	4,2	53,12	1,38	2,6	58,30	2,40	4,1	58,06	2,63	4,5
n	36			36			36			36		
MO %												
C	0,55	0,02	3,6	0,55	0,02	3,6	0,58	0,02	3,4	0,60	0,04	6,7
N	0,045	0,001	2,2	0,046	0,001	2,2	0,05	0,002	3,9	0,054	0,003	5,5
C/N	12,2	0,4	3,3	11,96	0,42	3,5	11,37	0,49	4,3	11,11	0,53	4,8
n	120			120			120			120		
pHeau	5,2	0,1	1,9	5,3	0,1	1,9	5,6	0,1	1,8	5,6	0,1	1,8
n	36			36			36			36		
Complexe d'échange cmol kg^{-1}												
Ca	0,82	0,03	3,6	0,69	0,03	4,3	0,6	0,02	3,3	0,9	0,05	5,5
Mg	0,42	0,02	4,8	0,35	0,01	2,8	0,34	0,01	2,9	0,36	0,02	5,5
K	0,05	0,003	6,0	0,08	0,003	3,7	0,16	0,006	3,7	0,15	0,005	3,3
Na	0,08	0,005	6,2	0,09	0,003	3,3	0,1	0,006	6,0	0,08	0,004	5,0
S	1,37	0,05	3,6	1,21	0,06	4,9	1,2	0,004	0,3	1,49	0,03	6,7
CEC	3,61	0,2	5,5	3,55	0,26	7,3	3,46	0,02	0,6	3,8	0,02	0,5
100S/CEC	38,0	1,3	3,4	34,0	0,94	2,8	35	0,67	1,9	39	0,60	1,5
n	36			36			36			36		
Densité apparente	1,35	0,11	8,1	1,43	0,15	10,5	1,39	0,14	10,1	1,42	0,14	9,8
n	34			34			34			34		

De part leurs caractéristiques morphologiques et physico-chimiques, les sols de terres de barre sont, d'après la classification française (CPCS, 1967), des sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris en argile. Dans le système FAO (1989), ce sont des Ferralsols rhodiques, ochriques ; du fait de l'existence d'un horizon B ochrique (couleur vive et teneur en carbone inférieure à 0,6%). Pour la Soil Taxonomy (USDA, 1975), il s'agit des Eustrustox (existence d'un B oxique dans un régime hydrique ustic).

5.2- Caractéristiques morphologiques

La végétation est un fourré arbustif dense.

La profondeur du sol au-dessus du matériau originel varie entre 6 et 8 m, mais seule la couche d'épaisseur 1,5 m a été étudiée ici.

Le profil pédologique typique rencontré sur le dispositif présente les caractéristiques morphologiques suivantes :

0 - 10 cm :

A11.

Brun rouge (5 YR 3/9) à l'état frais ; sableux à sablo-limoneux ; structure particulière plus ou moins nette ; très friable ; densité racinaire comprise entre 5 et 20 racines par dm^2 ; très poreux ; activité biologique intense (turricules de vers de terre et nids de termites) ; transition distincte et régulière.

10 - 30 cm :

A12.

Brun rouge (5 YR 3/4) à l'état frais. Sablo-limoneux ; structure particulière, très friable ; densité racinaire comprise entre 5 et 20 racines par dm^2 ; très poreux, activité biologique intense (termites et fourmis) ; transition distincte et régulière.

30 - 50 cm :

B1.

Rouge sombre (2,5 YR 3/6) à l'état frais ; limono-argilo-sableux à argilo-sableux ; structure massive à débit polyédrique subangulaire fin ; friable ; densité racinaire comprise entre 2 et 5 racines par dm^2 ; poreux ; activité biologique intense (poches et nids de fourmis) ; transition graduelle et régulière.

50 - 75 cm :

B211.

Rouge (2,5 YR 4/6) à l'état frais ; argileux ; structure massive à débit polyédrique ; ferme ; densité racinaire inférieure à 2 racines par dm^2 ; poreux ; activité biologique intense (nids de termites) ; transition graduelle et régulière.

75 - 150 cm :

B212.

Rouge (2,5 YR 4/8) à l'état frais ; argileux ; structure massive à polyédrique ; très ferme ; densité racinaire inférieure à 2 racines par dm^2 ; peu poreux ; activité biologique intense (galeries de termites et de fourmis).

5.3- Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats d'analyses physiques et chimiques sont résumés dans les tableaux II.3 et II.4. L'analyse granulométrique des sols des terres de barre a montré que la texture de l'horizon superficiel est toujours sableuse. La teneur en argile est comprise entre 8 et 14% avec une moyenne de 12,2%. Cette teneur augmente progressivement avec la profondeur, sans qu'un horizon d'accumulation (« ventre » d'argile) n'ait été observé. L'analyse minéralogique de la fraction argileuse révèle la dominance de kaolinite, la présence d'hématite, de goethite et de traces d'interstratifiés provenant de l'altération d'illite (FAUCK, 1972). Les faibles teneurs (2-3%) en limons (2 à 50 μm) sont caractéristiques des vieux sols ferrallitiques.

La densité apparente qui est de 1,40 dans l'horizon 0-10 cm, croît légèrement en passant de 1,46 à 1,58 dans la couche 20-40 cm puis à 1,56 avant de décroître à 1,55. La matière organique, peu abondante dans ces sols, est cependant bien humifiée avec un rapport C/N autour de 12 en surface et de 9 à 35 cm.

Les teneurs en carbone (0,55%) et azote (0,045%) sont faibles dès la surface. Ces sols sont moyennement acides (pH_{eau} : 5,5) en surface et deviennent fortement acides (pH_{eau} : 4,4) dans la couche 74-150 cm. Les bases échangeables ($1,40 \text{ cmol kg}^{-1}$) et la capacité d'échange ($3,60 \text{ cmol kg}^{-1}$) sont faibles dès la surface, comparées aux valeurs de 10 cmol kg^{-1} trouvées sous forêt (POSS, 1991). Par suite de leur longue histoire culturelle, le taux de saturation ($100 \times \text{S/CEC}$) est inférieur à 40 % lors de la mise en place (1988) de l'essai.

Tableau II.4 : Valeurs moyennes, écarts-types et coefficients de variation des des taux de carbone dans les profondeurs 0-10, 10-20 et 20-40 cm des parcelles soumises aux traitements M1, M2, NPK et T au démarrage des essais en mars 1988.

Profondeur (cm)	Paramètres statistiques	M1	M2	NPK	T	M1,M2,NPK et T moyennes, σ, c.v. et n
0-10	moyenne	0,55	0,55	0,58	0,60	0,59
	σ	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05
	C.V.%	3,6	3,6	3,4	6,7	8,5
	n	120	120	120	120	120
10-20	moyenne	0,50	0,49	0,48	0,45	0,49
	σ	0,06	0,06	0,07	0,05	0,08
	C.V.%	12,0	12,2	14,6	11,1	16,3
	n	120	120	120	120	480
20-40	moyenne	0,45	0,42	0,36	0,38	0,43
	σ	0,05	0,04	0,06	0,03	0,06
	C.V.%	11,1	9,5	16,7	7,9	13,9
	n	120	120	120	120	480

5.4- Hétérogénéité initiale du sol du dispositif

La variabilité spatiale des taux de carbone et d'azote totaux a été étudiée pour les horizons 0-10, 10-20 et 20-40 cm de toutes les parcelles à traiter au début de l'essai en 1988.

5.4.1- Méthodologie

- **Prélèvements** : les prélèvements sont réalisés dans toutes les mini-parcelles et tous les échantillons obtenus, sans constitution de composites, sont utilisés pour le dosage du carbone organique et l'azote totaux. L'étude de l'hétérogénéité intra et inter-parcellaire a porté sur 720 échantillons (60 x 3 profondeurs x 4 parcelles). Le plan d'échantonnage est schématisé dans l'annexe II.1.

- **Analyses** : le carbone est dosé par la méthode Walkley et Black (1934) et l'azote par la méthode Kjeldahl.

L'analyse statistique présentée ici pour la couche 0-10 cm (Tableau II.3), correspond à 36 répétitions pour la granulométrie, le pH et le complexe d'échange ; celle relative aux couches 0-10, 10-20 et 20-40 cm pour le C et N totaux (Tableaux II.4 et II.5) correspond à 120 répétitions, les analyses, au laboratoire, étant réalisées en double.

Les moyennes et écarts-types de quelques valeurs des caractéristiques physiques et chimiques initiales (1988) du sol des parcelles correspondant aux quatre traitements sont donnés dans les tableaux II.3 à II.5. Elles permettent de juger de l'hétérogénéité du sol du dispositif.

Sans entrer dans le détail des valeurs, on constate :

- une faible variabilité intra-parcellaire pour la granulométrie, le pH, le complexe d'échange, les teneurs en C et N avec des coefficients de variation (c.v.) variant entre 0,5 et 6,9 %.
- une variabilité intra-parcellaire faible à moyenne (c.v. compris entre 8,1 et 10,5 %) pour la densité apparente.
- une variabilité inter-parcellaire faible à moyenne (c.v. compris entre 6,9 et 16,3 %) pour le carbone et l'azote.

La variabilité inter-parcellaire des teneurs en C, N, S, CEC, pH et granulométrie est donc deux à dix fois supérieure à celle intra-parcellaires des teneurs en ces mêmes éléments.

Tableau II.5 : Valeurs moyennes, écarts-types, et coefficients de variation des taux d'azote dans les profondeurs 0-10, 10-20 et 20-40 cm des parcelles soumises aux traitements M1, M2, NPK et T au démarrage des essais en mars 1988.

Profondeur (cm)	Paramètres statistiques	M1	M2	NPK	T	M1,M2,NPK et T moyennes, σ, c.v.et n
0-10	moyenne	0,045	0,046	0,060	0,054	0,058
	σ	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003
	C.V.%	2,2	2,2	3,3	5,5	5,2
	n	120	120	120	120	480
10-20	moyenne	0,040	0,040	0,045	0,042	0,043
	σ	0,003	0,002	0,004	0,003	0,005
	C.V.%	7,5	5,000	8,9	7,1	11,6
	n	120	120	120	120	480
20-40	moyenne	0,036	0,036	0,038	0,036	0,037
	σ	0,003	0,004	0,004	0,003	0,004
	C.V.%	8,3	11,1	10,5	8,3	10,8
	n	120	120	120	120	480

5.5-Conclusion

En résumé, ces sols présentent les caractéristiques suivantes :

- des sols profonds et bien drainés,
- une texture qui passe de sablo-faiblement argileuse en surface, à argileuse dès 30 cm de profondeur mais sans horizon d'accumulation texturale,
- des teneurs en matière organique (MO) faibles
- des pH acides dès la surface, ceci s'accompagnant d'un taux de saturation en bases échangeables faible,
- une faible capacité d'échange et de faibles teneurs en bases échangeables.

Ces sols peuvent donc être considérés comme « dégradés ». Cette dégradation se traduit, entre autres, par une diminution du taux de (MO) et par l'appauvrissement du complexe d'échange qui en résulte (POSS, 1991 ; AZONTONDE, 1993 ; LAL, 1997).

Ils peuvent être également considérés, comme assez homogènes, compte tenu des valeurs globalement faibles des coefficients de variation (CV) de C et N dans le dispositif d'essai.

L'étude de la dynamique de MO dans ces sols à travers différents traitements peut donc être réalisée.

DEUXIEME PARTIE

(LES CONSTATATIONS)

L'INFLUENCE DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS SUR LA PRODUCTION, LES NIVEAUX DE RESTITUTION ET LES PROPRIETES DU SOL

Cette deuxième partie a fait l'objet d'une publication dans "*Agriculture et développement*" Spécial Sols Tropicaux n° 18, juin 1998 pp. 55-62, sous le titre '*Le Mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au sud du Bénin*'.

L'objectif de cette deuxième partie est de quantifier les effets du *Mucuna* sur les productions en maïs-grains et matière sèche (MS) du maïs (hors les grains) et les modifications induites par le système *Mucuna*-maïs sur les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des sols de terres de barre.

Cette partie comporte deux chapitres :

- le premier (chapitre 3) étudie les productions en maïs grains, matière sèche de maïs hors-grains et les restitutions en matière sèche et éléments minéraux au sol ;
- le deuxième (chapitre 4) étudie les effets du *Mucuna* sur les caractéristiques des sols.

CHAPITRE III

INFLUENCE DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS SUR LA PRODUCTION EN MAÏS ET LES RESTITUTIONS AU SOL.

Dans ce chapitre, l'influence du *Mucuna* sur la production est appréciée à travers les rendements en maïs-grains et en matières sèches hors-grains obtenus dans toutes les parcelles.

1- METHODOLOGIE

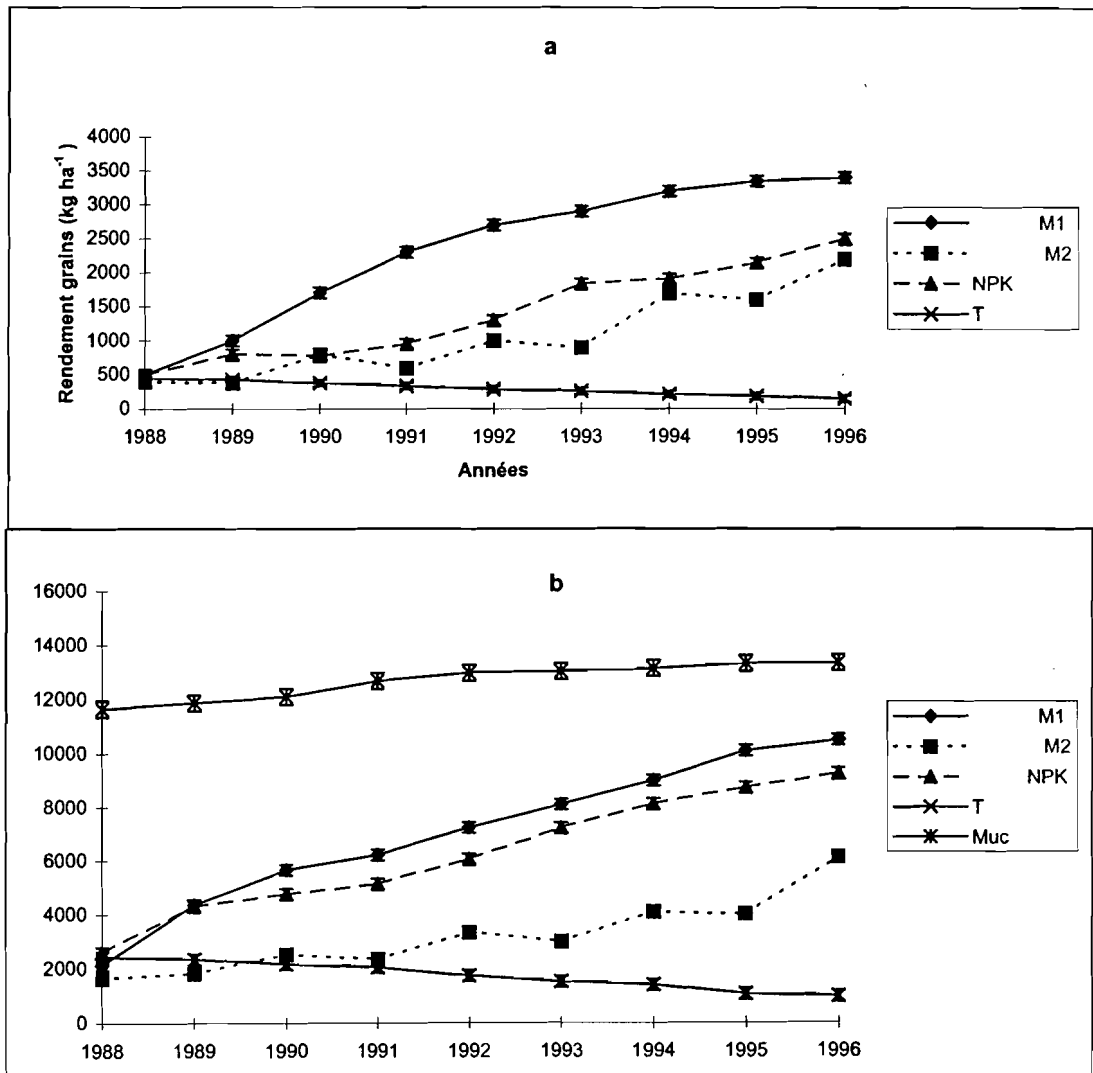
Le dispositif comporte quatre parcelles subdivisées en 60 mini-parcelles de 4m² (Annexe II.1).

1.1- Prélèvements de plantes

- Maïs

Les parties aériennes sont prélevées, pour chaque traitement, sur une surface de 1m² (6 plants) dans 4 mini- parcelles réparties au hasard. L'estimation du rendement en grains est faite après récolte sans tenir compte des plants de bordure, soit sur une surface utile de 1 m² correspondant à 6 pieds de maïs. Les teneurs en carbone, azote et autres (P, K, Ca et Mg) sont déterminées sur les grains, les tiges et les feuilles. Les dates de prélèvement sont : début juin (début floraison), fin juin (pleine floraison) et août (à la récolte du maïs). La biomasse racinaire est estimée en fin de récolte.

Figure III.1 (a et b) : Evolution des productivités en maïs grains (a) et en matière sèche (b) maïs et Mucuna (Muc) de 1988 à 1996 selon les traitements. Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (Sx)



- *Mucuna*

Les parties aériennes et racinaires sont prélevées sur une surface de 1 m² avec quatre répétitions.

Les parties souterraines sont prélevées sur les profondeurs 0-10, 10-20 et 20-40 cm. Les débris végétaux supérieurs à 1 mm sont séparés par tamisage sous eau et les racines sont triées manuellement. Les dates de prélèvement sont mi-avril (il s'agit du *Mucuna* de l'année) pour les traitements M1 et M2 (année *Mucuna*), début août, début octobre (période de croissance végétale maximale).

Un suivi interannuel de la productivité du maïs a été fait de 1988 à 1996 et un suivi saisonnier des productivités du maïs et du *Mucuna* a été mené au cours de l'année 1995-96.

Tous les résultats de biomasses aériennes et racinaires du *Mucuna* et du maïs sont exprimés en kg MS ha⁻¹ et les concentrations en éléments chimiques en g kg⁻¹ MS.

1.2- Méthodes analytiques

Les échantillons végétaux sont finement broyés (1 mm) après séchage à l'étuve (70°C). Les teneurs en C et N sont déterminées respectivement selon les méthodes WALKLEY & BLACK (1934) et KJELDALH.

Les teneurs en Ca, Mg, K, Na et P totaux sont déterminées par voie sèche ; après calcination à 425°C, reprise des cendres par HCl 2N et HNO₃ concentré, Ca, Mg, K et Na sont dosés par spectro-photométrie d'absorption et P par la méthode BRAY1.

2. RESULTATS

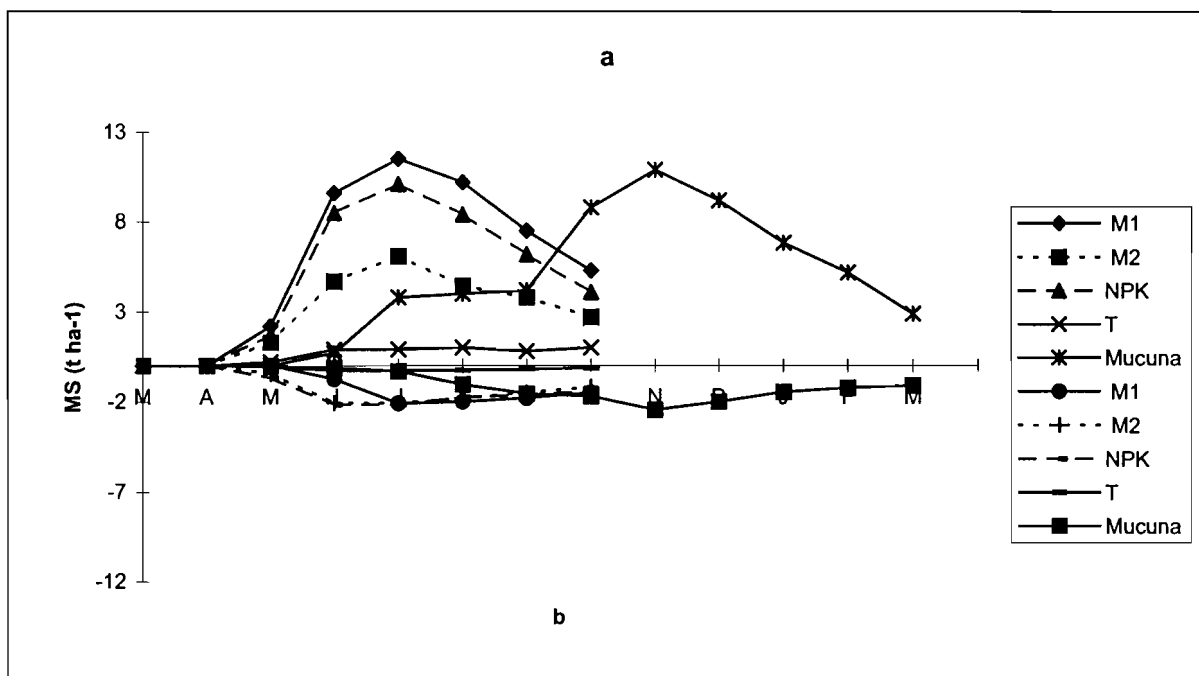
2. 1. Rendements en maïs de 1988 à 1996

Les résultats sont schématisés sur les figures III.1a et III.1b.

En début d'essai, les rendements en maïs ne diffèrent pas significativement entre traitements.

Par rapport au témoin T, on note des augmentations régulières et significatives des rendements de maïs pour les traitements M1, M2 et NPK. Le sens général des variations est le suivant :

Figure III.2 : Dynamique saisonnière de la production en matière sèche des parties aériennes (a) et racinaires (b) au cours de la croissance du maïs et du Mucuna 1995-1996



- pour les rendements en grains : $M1 > NPK = M2 > T$.

- pour les rendements en matière sèche hors-grains : $M1 > NPK > M2 > T$.

De 1988 à 1996 les rendements en grains ont augmenté de 500 à 3500 kg ha⁻¹ et en MS totale hors-grains de 2000 à 12700 kg ha⁻¹ pour le traitement M1 (avec *Mucuna* tous les ans). Ils sont passés de 500 à 2500 kg ha⁻¹ de grains et de 200 à 11400 kg ha⁻¹ de biomasse sèche hors-grains pour NPK ; puis de 500 à 1600 kg ha⁻¹ de grains et 200 à 8200 kg ha⁻¹ de matière sèche hors-grains pour M2a (années avec *Mucuna*) et de 500 à 2200 kg ha⁻¹ de grains pour M2b (années avec arrière effet *Mucuna*).

Par contre, pour le traitement T, les rendements en grains et MS hors-grains ont diminué en passant respectivement de 500 à 200 et de 2000 à 1250 kg ha⁻¹ pour le traitement témoin.

A noter que si les rendements en grains du traitement M1 sont supérieurs à ceux du traitement NPK, les rendements en MS hors-grains sont pratiquement identiques. Pour le traitement M2, les variations interannuelles des rendements en « dents de scie », avec des valeurs plus élevées pour les années avec précédent *Mucuna*, illustrent l'effet positif, et à cours terme, de la décomposition du *Mucuna* sur la productivité du maïs.

Enfin, noter que, tous traitements confondus, les rendements en grains représentent 20 à 25% de la MS du maïs. Ces observations sont en accord avec celles de HAMADINA (1996) qui donne des valeurs de 20% et 15% pour des essais avec *Mucuna* sur des ultisols dégradés du Nigéria.

2.2 - Dynamique saisonnière de la production végétale du maïs et du *Mucuna*

L'évolution de la croissance du maïs et du *Mucuna*, suivie au cours de l'année 1996, a été matérialisée sur les figures III.2a et III.2b.

-Maïs :

Le cycle végétatif du maïs peut être divisé en 4 phases principales :

- de 0 à 30 jours après semis, la production de MS cumulée est faible. Pour une densité de 62000 pieds/ha, la production aérienne à la fin de cette phase est de 430 kg ha⁻¹ pour le témoin,

1690 kg ha⁻¹ pour NPK, 1340 kg ha⁻¹ pour M2 (année sans *Mucuna*), 1600 kg ha⁻¹ pour M2 (année avec *Mucuna*) et 2230 kg ha⁻¹ pour M1,

- de 30 à 60 jours après semis, la vitesse de croissance est maximale et la quantité de MS aérienne produite est élevée (T : 890 kg ha⁻¹ , NPK : 8450 kg ha⁻¹ , M2 : 4690 et 9045 kg ha⁻¹ et M1 : 9590 kg ha⁻¹),

- de 60 à 105 jours (maturité) après semis, la production de MS continue de croître mais dans une proportion moindre qu'au cours de la deuxième phase,

- de la maturité à la récolte, la quantité de MS produite décroît.

Le sens de variation générale pour la biomasse aérienne est M1 # NPK > M2 > T

La croissance racinaire suit la même évolution jusqu'à la phase de maturité, à partir de laquelle elle devient nulle, puis la quantité de MS produite commence à décroître.

Le sens général de variation pour la partie racinaire est M1 > NPK > M2 > T.

- *Mucuna* :

Le cycle du *Mucuna* peut être globalement divisé en trois phases :

- de 0 à 110 jours, la croissance est lente et la production de MS est faible (moins de 4000 kg ha⁻¹),

- de 110 à 180 jours la croissance est maximale ; la production aérienne passe de 4000 à plus de 10.000 kg ha⁻¹ ,

- à partir de 180 jours, la production de matière sèche commence à décroître.

La croissance des parties racinaires varie globalement de la même manière avec la différence que la phase 1 ne couvre que 60 jours et la phase 2, plus longue s'étale de 60 à 180 jours.

Le décalage des cycles du maïs et du *Mucuna* est bien illustré sur la figure III.2a, ce qui montre l'adaptation du système *Mucuna*-maïs au contexte climatique du sud-Bénin.

2.3- Restitutions organiques et minérales sous forme végétale

La composition des parties aériennes et racinaires est représentée au tableau III.1 et les quantités restituées au sol selon les différents traitements aux tableaux III.2 en annexe III.1 et sur la figure III.3.

Les stocks de MS et d'éléments minéraux et organiques restitués au sol par la biomasse totale

Tableau III.1 : Matière sèche et composition chimique du maïs et du Mucuna de 1988 à 1996.

Chaque valeur est assortie de l'écart-type de la moyenne (Sx)

Plante	Organe	Traitements	Calcul statistique	Restitution MS (Kg ha ⁻¹) n=4	Composition (g kg ⁻¹) de matière sèche						
					C	N	P	K	Ca	Mg	C/N
Maïs	Parties aériennes (PA)	T	moyenne	970	532,5	4,5	2,8	4,5	2	5,1	118,3
			écart type	±43	±26	±0,09	±0,06	±0,02	±0,01	±0,02	
		NPK	moyenne	9260	523,6	7	8,5	9	5,5	5,6	74,8
			écart type	±230	±16	±0,3	±0,26	±0,32	±0,21	±0,36	
		M2	moyenne	6140	533,1	6,3	5,5	5	2,5	6,8	84,6
			écart type	±184	±14	±0,23	±0,21	±0,15	±0,12	±0,24	
	M1	moyenne	10510	538,4	6,6	7,5	8	3,2	7,5	81,6	
		écart type	±265	±9,5	±0,3	±0,3	±0,4	±0,1	±0,3		
	Parties racinaires (PR)	T	moyenne	280	473,6	4	1,8	2,6	1,2	4,8	118,4
			écart type	±9	±19,9	±0,2	±0,06	±0,05	±0,03	±0,3	
		NPK	moyenne	2180	508,1	6,5	7,1	7,3	4,5	5	78,2
			écart type	±68	±20,3	±0,26	±0,22	±0,25	±0,2	±0,31	
M2		moyenne	2100	449,3	6,2	4,3	4,2	2,1	5,9	72,5	
		écart type	±90	±15,7	±0,27	±0,32	±0,24	±0,12	±0,21		
M1	moyenne	2180	455,9	5	6,3	7,6	2,6	6,9	91,2		
	écart type	±87	±20,5	±0,2	±0,33	±0,32	±0,11	±0,25			
Mucuna	Parties aériennes (PA)	M2*	moyenne	0/10890	0/488,4	0/26,5	0/9,5	0/21,6	0/3,5	0/8,5	
			écart type	±357	±26,8	±1,3	±0,2	±1,2	±0,1	±0,3	
		M1	moyenne	10890	488,4	26,5	9,5	21,8	3,8	9	18,4
			écart type	±316	±24,5	±1,15	±0,36	±0,87	±0,11	±0,26	
	Parties racinaires (PR)	M2*	moyenne	0/2450	0/454,6	0/20,5	0/8,9	0/18,7	0/2,8	0/8	
			écart type	±95	±23,5	±0,4	±0,24	±0,6	±0,1	±0,2	
M1	moyenne	2450	454,6	20,5	8,9	18,7	3,1	8,3	22,2		
	écart type	±76	±20,2	±1,2	±0,3	±0,6	±0,1	±0,2			

M2* : matière sèche, C organique et éléments minéraux du Mucuna sont nuls une année sur deux.

(feuilles, tiges et racines du maïs et parties aérienne et racinaire du *Mucuna*) varient selon les traitements :

- Témoin. Les restitutions au sol sous forme végétale sont en moyenne 1250 kg MS ha⁻¹, 650 kg C ha⁻¹, 5 kg N ha⁻¹, 3 kg P ha⁻¹, 5 kg K ha⁻¹, 2 kg Ca ha⁻¹ et 6 kg Mg ha⁻¹.
- NPK. Les restitutions sont d'environ 11440 kg MS ha⁻¹, 5957 kg C ha⁻¹, 79 kg N ha⁻¹, 94,2 kg P ha⁻¹, 99 kg K ha⁻¹, 61kg Ca ha⁻¹ et 63 kg Mg ha⁻¹.
- M2. Pour ce traitement, il faut distinguer les années avec ou sans *Mucuna* :
 - * Avec *Mucuna*, restitutions de 11329 kg MS ha⁻¹, 12343 kg C ha⁻¹, 410,5 kg N ha⁻¹, 185,4 kg P ha⁻¹, 391,8 kg K ha⁻¹, 72,6 kg Ca ha⁻¹ et 187,9 kg Mg ha⁻¹.
 - * Sans *Mucuna*, le niveau de restitution chute à 8240 kg MS ha⁻¹, 4216,5 kg C ha⁻¹, 51,7 kg N ha⁻¹, 43, 39, 20 et 54 kg Mg ha⁻¹ de P, K, Ca et Mg.
- M1. Les restitutions sont d'environ 26000 kg MS ha⁻¹, 13100 kg C ha⁻¹, 419 kg N ha⁻¹, 218 kg K ha⁻¹, 384 kg Ca ha⁻¹ et 212 kg Mg ha⁻¹.

Le niveau des restitutions des éléments nutritifs au sol varie globalement dans le sens suivant (Fig. III.3) : M1 = M2b > NPK > M2a > T, avec une participation des restitutions racinaires approximativement égales à 20% des restitutions totales.

De manière générale, on retiendra, à l'exception du calcium, les forts niveaux de restitution au sol d'éléments fertilisants par le *Mucuna*.

Il faut noter également la différence importante des rapports C/N de la MS entre le maïs et le *Mucuna* : les C/N du maïs varient de 118 pour le témoin à 72,5 pour NPK, alors que les C/N de *Mucuna* varient entre 18 et 22, ce qui indique une bonne efficacité de la fixation symbiotique de l'azote par le *Mucuna*.

Tableau III.2 : Stocks (kg ha⁻¹) d'éléments organiques et minéraux restitués au sol par le maïs et le Mucuna.
Année 1995

Plante	Organe	Traitements	Restitution au sol (kg ha ⁻¹)				n=12	
			C	N	P	K	Ca	Mg
Maïs	PA	T	516,5	4,4	2,7	4,4	1,9	4,9
		NPK	4849	64,8	78,7	83,3	50,9	51,8
		M2a	3273	38,7	33,8	30,7	15,3	41,7
		M2b	4958	58,6	51,1	46,5	23,2	63,2
		M1	5658,6	69,4	78,8	84,1	33,6	78,8
	PR	T	132,6	1,1	0,5	0,7	0,3	1,3
		NPK	1107,6	14,2	15,5	15,9	9,8	10,9
		M2a	943,5	13	9	8,8	4,4	12,4
		M2b	952,5	13,1	9,1	8,9	4,4	12,5
		M1	993,9	10,9	13,7	16,6	5,7	15
Mucuna	PA	M2	5318,7	288,6	103,4	235,2	38,1	92,6
		M1	5318,7	288,6	103,4	237,4	41,4	98
	PR	M2	1113,8	50,2	21,8	45,8	6,9	19,6
		M1	1113,8	50,2	21,8	45,8	7,6	20,3
		T	649,1	5,5	3,2	5,1	2,2	6,2
		NPK	5956,6	79	94,2	98,8	60,7	62,7
		PA + PR	M2a	4216,5	51,7	42,8	39,5	19,7
		M2b	12343	410,5	185,4	391,8	72,6	187,9
		M1	13085	419,1	217,7	383,9	88,3	212,1

PA = Parties aériennes

PR = Parties racinaires

(feuilles, tiges et racines du maïs et parties aérienne et racinaire du *Mucuna*) varient selon les traitements :

- Témoin. Les restitutions au sol sous forme végétale sont en moyenne 1250 kg MS ha⁻¹, 650 kg C ha⁻¹, 5 kg N ha⁻¹, 3 kg P ha⁻¹, 5 kg K ha⁻¹, 2 kg Ca ha⁻¹ et 6 kg Mg ha⁻¹.

- NPK. Les restitutions sont d'environ 11440 kg MS ha⁻¹, 5957 kg C ha⁻¹, 79 kg N ha⁻¹, 94,2 kg P ha⁻¹, 99 kg K ha⁻¹, 61kg Ca ha⁻¹ et 63 kg Mg ha⁻¹.

- M2. Pour ce traitement, il faut distinguer les années avec ou sans *Mucuna* :

* Avec *Mucuna*, restitutions de 11329 kg MS ha⁻¹, 12343 kg C ha⁻¹, 410,5 kg N ha⁻¹, 185,4 kg P ha⁻¹, 391,8 kg K ha⁻¹, 72,6 kg Ca ha⁻¹ et 187,9 kg Mg ha⁻¹.

* Sans *Mucuna*, le niveau de restitution chute à 8240 kg MS ha⁻¹, 4216,5 kg C ha⁻¹, 51,7 kg N ha⁻¹, 43,39, 20 et 54 kg Mg ha⁻¹ de P, K, Ca et Mg.

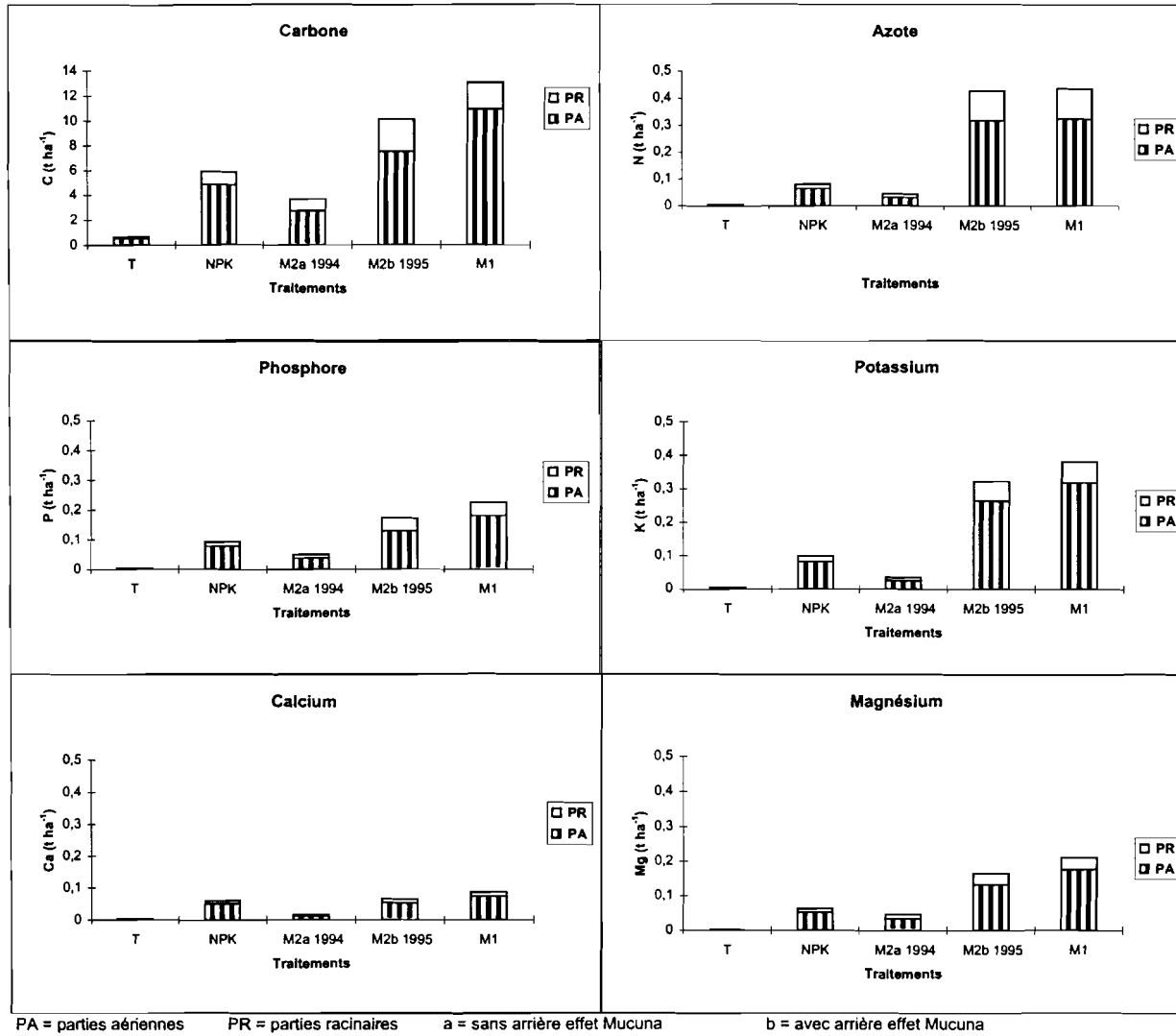
- M1. Les restitutions sont d'environ 26000 kg MS ha⁻¹, 13100 kg C ha⁻¹, 419 kg N ha⁻¹, 218 kg K ha⁻¹, 384 kg Ca ha⁻¹ et 212 kg Mg ha⁻¹.

Le niveau des restitutions des éléments nutritifs au sol varie globalement dans le sens suivant (Fig. III.3) : M1 = M2b > NPK > M2a > T, avec une participation des restitutions racinaires approximativement égales à 20% des restitutions totales.

De manière générale, on retiendra, à l'exception du calcium, les forts niveaux de restitution au sol d'éléments fertilisants par le *Mucuna*.

Il faut noter également la différence importante des rapports C/N de la MS entre le maïs et le *Mucuna* : les C/N du maïs varient de 118 pour le témoin à 72,5 pour NPK, alors que les C/N de *Mucuna* varient entre 18 et 22, ce qui indique une bonne efficacité de la fixation symbiotique de l'azote par le *Mucuna*.

Figure III.3 : Stocks d'éléments organiques (C) et minéraux (N, P, K, Ca, Mg) ($t\ ha^{-1}\ an^{-1}$) restitués au sol par les traitements en 1994 et 1995.



3. DISCUSSION

3.1- Effets des traitements sur les variations interannuelles des rendements

L'analyse des figures III.1a et III.1b fait ressortir que, les rendements en maïs grains et MS du témoin, déclinent avec le temps, tandis qu'ils augmentent pour les trois autres traitements (M1, M2, NPK).

En considérant le traitement témoin (T), les rendements en MS décroissent de 2400 à 1250 kg/ha et ceux en grains de 400 à 150 kg/ha de grains. Cette baisse est liée à la faiblesse du niveau des restitutions en nutriments (cf. fig. III.2) et à une dégradation des propriétés du sol (cf. chapitre IV). Ce second aspect sera commenté ultérieurement. Ce constat est fréquent dans les sols tropicaux en culture traditionnelle de longue durée (SANCHEZ, 1976 ; WERTZ, 1979 ; PIERI, 1989 ; LAL, 1997 ; AZONTONDE et al., 1998 ; OUATTARA et al., 1997).

Traitement M1. Le système *Mucuna*-maïs qui associe le maïs au *Mucuna* tous les ans montre les augmentations les plus spectaculaires : on passe de 2100 à 26030 kg MS ha⁻¹ et une production en grains de 500 à 3400 kg ha⁻¹ (Fig. III. 1a et III.1 b). Les parties aériennes du maïs seul produisent 10500 kg MS ha⁻¹ ; BUNCH (1993) au Nigéria, signale des rendements similaires (10 000 kg MS ha⁻¹) et BROM et al. (1988) notent après huit années d'essais en système M1 une augmentation en rendement de maïs grains de 157%. HAMADINA (1996) indique pour un Ultisol en zone forestière humide au Nigéria, une augmentation du rendement en maïs de 85 % pour un maïs semé dans un paillis de *Mucuna pruriens utilis*.

Traitement M2. Ce traitement permet aussi une augmentation notable de rendement en grains de maïs qui atteint 2300 kg ha⁻¹ l'année suivant le *Mucuna* mais des valeurs plus faibles (1630 kg ha⁻¹), en absence d'effet *Mucuna*. Toutefois, un effet cumulatif se manifeste au long des 8 années de l'essai, ce qui correspond à une amélioration des conditions édaphiques (cf. chapitre IV). Ces variations en dents de scie des rendements illustrent tout de même la potentialité de l'effet à court-terme des restitutions par le *Mucuna*.

Traitement NPK. Les augmentations sont du même ordre de grandeur qu'avec le traitement M2. Les effets de la fertilisation minérale sont bien connus. Pour le traitement NPK, il y a

association d'une fumure minérale moyenne et de restitutions organiques. De nombreux travaux en zone semi-aride à sub-humide d'Afrique ont montré l'intérêt pour la durabilité des systèmes de production, basés sur une fertilisation organo-minérale (synthèse de PIERI,1989, BATIONO et al.,1998)

3.2- Effet des traitements sur la dynamique saisonnière de la production végétale

La productivité (rappel fig.III.1a et III.1b) reste, tout le long du cycle du maïs, toujours plus élevée pour M1, aussi bien pour la biomasse aérienne que racinaire. Elle diminue dans le sens $M1 > NPK > M2 > T$. On retrouve donc au niveau intra-annuel le sens des variations inter-annuelles.

De la maturité à la récolte du maïs, la quantité de matière sèche produite commence à décroître. Cette diminution a principalement pour origine une réduction de 41% du poids des feuilles à la fin du cycle cultural (POSS, 1991). Mais ce phénomène qui est plus fréquent sur le sorgho (JACQUINOT,1964) ; ARRIVETS,1976 ; GIGOU, 1983), le mil (SIBAND, 1981) et sur le riz (GIGOU et CHABALIER, 1986), semble avoir été moins remarqué sur le maïs (HANWAY, 1962).

Quant au *Mucuna*, c'est surtout de 105 à 110 jours après le semis et aussi après la récolte du maïs, que la croissance s'accélère par suite de la réduction de la compétition avec le maïs pour l'éclairement, la nutrition minérale et l'aération du sol. A la fin du cycle, on observe, comme pour le maïs, une diminution mais beaucoup plus rapide de la quantité de MS produite. En fait, ce processus commence dès le 2^{ème} mois (TRIOMPHE, 1996 ; LEGER-CRESSON, 1989) avec une perte des feuilles à la base, mais la production de matière végétale étant forte, la croissance se poursuit. La diminution de MS n'est visible qu'en fin du cycle, au moment de la sénescence.

3.3- Effet des traitements sur le niveau des restitutions organiques et minérales au sol

De manière générale le niveau des restitutions organiques (C,N) et minérales (K, Ca, Mg, P) sous forme végétale, sans y inclure l'apport d'engrais sous forme minérale, varie dans le sens M1 > M2b > NPK > M2a > T et évolue donc globalement dans le sens des rendements en maïs-grains au cours d'une année. C'est donc l'ensemble des restitutions au sol, et pas uniquement un des éléments qui peut expliquer, en partie, les différences de productivité végétale. Par ailleurs, la différenciation des propriétés physiques et chimiques du sol (cf. chapitre IV) selon les traitements est aussi à prendre en considération. Ceci sera discuté ultérieurement.

Le niveau des restitutions (parties aériennes + parties racinaires) par le *Mucuna* est particulièrement élevé pour N (339 kg ha⁻¹an⁻¹), P (125 kg ha⁻¹an⁻¹), K (281 kg ha⁻¹an⁻¹), Mg (118 kg ha⁻¹an⁻¹) et plus faible pour Ca (49 kg ha⁻¹an⁻¹). L'azote et le potassium constituent les éléments les plus abondants dans les restitutions du *Mucuna*. MANDIMBA et WEST (1996) au Congo et REDSHAW (1982) en Indonésie parviennent à la même conclusion pour l'azote dont les stocks restitués s'élèvent respectivement à 340 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour le *Mucuna* et 130 à 180 kg ha⁻¹an⁻¹ pour le *Pueraria javanica*. Par ailleurs, REDSHAW constate également que l'azote et le potassium constituent les éléments les plus abondants dans le mulch de *Pueraria javanica*. SANGINGA et al.(1996) dans les mêmes conditions climatiques sur alfisols au Nigéria trouvent que l'azote est l'élément le plus abondant dans la biomasse du *Mucuna* qui accumule en 12 semaines 313 kg N ha⁻¹ en culture pure et 166 kg N ha⁻¹ en culture associée. Ces quantités sont proches de celles déterminées par TRIOMPHE (1996) sur la composition du *Mucuna* en Honduras ; mais TRIOMPHE (1996) précise que le *Mucuna* recycle annuellement 200-300 kg N ha⁻¹ et fixe 130-170 kg N ha⁻¹. HAMADINA (1996) trouve que l'utilisation du *Mucuna* comme engrais vert équivaut à l'apport au sol pour une culture du maïs de 97 kg N ha⁻¹an⁻¹ ; ce qui réduirait par conséquent les besoins d'application de la fertilisation azotée.

CHAVES et al., (1997) recommandent l'utilisation du *Mucuna pruriens* entre les lignes de caféiers comme une stratégie de restauration des sols de l'état de Panama au Brésil, parce qu'il apporte au sol chaque année une importante quantité de MS (10-15 t ha⁻¹) et d'éléments minéraux (0,01 à 0,2 t ha⁻¹) et permet ainsi de relever la fertilité de ces sols.

Il y a donc avec le *Mucuna*, hors l'élément azote provenant de la fixation atmosphérique, un recyclage important des éléments nutritifs (N, K, Ca et Mg) dans les 40-50 premiers centimètres du sol. Ce niveau de restitution que procure le système *Mucuna*-maïs (M1) est comparable à celui trouvé en zone tropicale par NYE et GREENLAND (1990) cités par SEBILLOTTE en 1991 : « dans une forêt secondaire de 18 ans, on trouve dans les parties aériennes 0,56 t ha⁻¹ d'azote, 0,07 t ha⁻¹ de phosphore, 0,4 t ha⁻¹ de potassium et 0,56 t ha⁻¹ de calcium et de magnésium. Ces résultats confirment donc l'affirmation de BUNCH qui rapportait en 1986 que le *Mucuna* a pu raccourcir l'occupation de la terre en jachère de 10 ans à un an seulement. Mais dans le système étudié, les restitutions viennent aussi des résidus de récolte du maïs. L'effet des traitements s'exprime à la fois sur les quantités de MS restituées (liées à la productivité végétale) et sur la composition de ces MS. Ainsi :

- on observe que les teneurs en éléments minéraux des biomasses aériennes et racinaires du maïs à la récolte sont généralement plus élevées pour le traitement M1 que pour T et M2, et du même ordre de grandeur que pour NPK (Tableau III.1).

POSS (1991) sur terres de barre au Togo trouve également que l'azote et le potassium sont les éléments les plus abondants dans les restitutions du maïs, mais avec des stocks annuels plus faibles (117 kg N ha⁻¹, 117,5 kg K ha⁻¹, 24,9 kg Ca ha⁻¹, 21 kg Mg ha⁻¹ et 14,8 kg P ha⁻¹) de maïs NH1 fertilisé avec 60 unités de N, 30 unités de P et 60 unités de K.

- on note aussi que les teneurs en magnésium des parties aériennes du maïs diminuent quand les teneurs en potassium augmentent. Ces observations sont conformes à celles faites par POSS (1991) et SARAGONI et POSS (1991) sur terre de barre au Togo. CALMES (1959) et LOUE (1980) avaient déjà remarqué qu'il existe une liaison entre les teneurs en K et celles en Mg des feuilles.

3.4- Conclusion

En conclusion à ce chapitre, on retiendra que le système *Mucuna*-maïs (traitement M1) favorise, à la fois, des restitutions organiques et minérales importantes, avec un recyclage élevé en éléments nutritifs tels que N, P, K et Mg. Il en résulte une productivité élevée dès la mise en place du dispositif, productivité qui croît au cours du temps (effets cumulatifs). Les MO restituées par le *Mucuna* ont un rapport C/N faible (d'environ 20) ce qui montre indirectement que l'efficacité de la fixation symbiotique de l'azote est relativement élevée pour le *Mucuna* (*pruriens utilis*) utilisé.

Il est possible de n'implanter le *Mucuna* que tous les 2 ans (traitement M2), ce qui peut permettre une éventuelle deuxième culture annelle de maïs. Certes, les augmentations de rendements observées sont moins importantes que pour M1, elles sont toutefois notables et un effet cumulatif est aussi observé au cours du temps. Cette pratique peut donc être conseillée pour une restauration de la fertilité des terres de barre dégradées.

4. QUELQUES ASPECTS ECONOMIQUES DE LA MISE EN OEUVRE DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS

4.1- Environnement socio-économique

La forte pression démographique (200-400 habitants/km²) a considérablement réduit au sud-Bénin la durée des jachères. Cette situation entraîne une dégradation des sols qui a pour principales causes :

- l'exportation des nutriments par les récoltes,
- la baisse importante du taux de matière organique modifiant ainsi l'ensemble des cycles biogéochimiques dont ceux des nutriments majeurs comme l'azote par exemple (ROOSE, 1970, 1981).
- les pertes par ruissellement et érosion,
- l'acidification et la toxicité aluminique du sol.

Par ailleurs, il existe un déséquilibre entre cultures de rente (coton, arachide, palmier à huile, cocotier, anacardier, ananas etc.) et cultures vivrières (maïs, manioc, sorgho, etc.) au détriment de ces dernières, contribuant ainsi à augmenter le flux des importations de céréales. C'est dans cet environnement que le système *Mucuna*-maïs a fait son apparition en 1988 pour la restauration des sols sur les plateaux du sud-Bénin.

Ce système de culture qui a été très vite adopté par les agriculteurs (50-60 % des agriculteurs des plateaux, donne de grands espoirs dans cette zone où l'auto-suffisance alimentaire n'est plus assurée.

4.2- Intérêts et inconvénients liés à l'utilisation du système *Mucuna*-maïs

Le système *Mucuna*-maïs procure aux agriculteurs de nombreux avantages. Ce système permet la culture en continu d'une même parcelle pendant de longues années (plus de dix ans) avec une restauration progressive de la fertilité tant du point de vue de la productivité que des propriétés édaphiques. Ceci correspond à une intensification certaine par rapport au système traditionnel jachère-maïs qui ne permet de cultiver le sol que de façon intermitante.

Dans la conduite des opérations culturales, les avantages sont très sensibles. Ce système demande peu de main-d'oeuvre et le temps de travail est nettement plus faible que celui en système traditionnel. On évite en effet, les travaux de préparation du sol liés à l'élimination des adventices herbacées et surtout ligneuses, puis que, dans ce système, ces travaux se limitent à la suppression des adventices à la houe dans le mulch du *Mucuna*. La réduction du temps de travail peut être estimée à 60 %.

Par ailleurs, avec le paillis :

- l'humidité du sol et l'infiltration des eaux de pluies augmentent (LAL, 1997),
- l'érosion et le ruissellement restent faibles favorisant ainsi la conservation du sol et de l'eau dans le profil (AZONTONDE, 1998),
- les brusques variations de température et d'humidité sont limitées,
- les activités microbiennes et fauniques en particulier, les populations, des vers terre augmentent notablement BARTHES et al. (1999) dénombrent sous le couvert du *Mucuna* de M1, environ 210.000 vers ha⁻¹, contre 38.000 sous le témoin T. Ceci contribue, probablement, à une amélioration de la structure du sol, au développement et à une meilleure utilisation de l'eau,
- la restitution en nutriments pour la plante et les organismes vivants du sol sont plus importants,
- le développement des adventices en particulier de *Imperata cylindrica* est limité.

De cet ensemble d'effets favorables du *Mucuna* résulte des rendements en maïs plus élevés et plus stables d'une année à l'autre que ceux obtenus en système traditionnels.

Il existe cependant des inconvénients liés à la pratique de ce système parmi lesquels :

- la perte de la deuxième saison de culture pendant la petite saison des pluies, puisque le *Mucuna* occupe le sol pendant cette période. Toutefois, cette deuxième récolte est considérée comme aléatoire en raison de l'irrégularité des pluies durant cette courte période (1 à 2 mois)

et les pertes en productivité de cette deuxième culture de maïs sont largement compensées par les gains en présence de *Mucuna*,

- l'humidité et le pédoclimat frais entretenus sous le mulch du *Mucuna* attirent les serpents, les lézards et les rats. Ceci retient certains agriculteurs de mettre en oeuvre de cette technique.

4.3- Quelques données économiques

Le revenu de l'agriculteur augmente rapidement, avec une augmentation de 600% des rendements (200 à 1200 kg ha⁻¹ an⁻¹) dès la première année de maïs après le *Mucuna*. Cette augmentation diminue ensuite. En huit ans le rendement en maïs est passé de 500 à 3400 kg ha⁻¹ an⁻¹ soit une augmentation moyenne annuelle de 362 kg ha⁻¹. Le revenu supplémentaire moyen annuel est de 72,4% par rapport à celui de la culture traditionnelle en début d'essais. Par rapport aux traitements M2 et NPK, le surplus de bénéfice est de 48% et 36% respectivement. Le maïs est à la fois une culture vivrière et une culture de rente. Le profit dégagé par cette culture est supérieur à celui généré par la culture du coton qui représente la principale culture de rente protégée par l'Etat. Sur 3,0 t de maïs grains produits (M1), le paysan en consomme 1,2 t et peut donc en vendre 1,8 soit un profit annuel de 120 000 F.cfa ha⁻¹. Pour le traitement NPK (2,5 t), après déduction des frais d'engrais (40 000 F.cfa), le profit annuel n'est que de 30 000 F.cfa ha⁻¹. Pour la culture de coton, le rendement moyen à l'hectare est de 1 t que le paysan vend à au plus 150 000 F.cfa. Mais, les frais occasionnés par la main-d'oeuvre pour l'achat d'engrais minéral lui reviennent à environ 160 000 F.cfa ha⁻¹. Le déficit est donc de 10 000 F.cfa ha⁻¹, si le paysan ne s'investit pas suffisamment afin d'amoindrir les dépenses. La culture de coton requière des exigences importantes (brûlis des tiges de coton de la saison précédente, 3 sarclo-buttages etc.), avec l'utilisation d'engrais (NPK et urée) qui n'est fourni que pour la production du coton. Certains producteurs détournent une partie de l'engrais acheté vers la culture du maïs afin de faire face au déficit occasionné par la culture du coton. Mais il arrive que malgré cela les revenus n'arrivent pas à compenser les frais engagés dans l'achat de l'engrais. Cette situation justifie le fait que de nombreux producteurs se consacrent de plus en plus à la culture du maïs et principalement au système *Mucuna*-maïs qui avec beaucoup moins de dépenses leur permet de réaliser un profit suffisant pour faire face aux besoins sociaux croissants.

Les rendements utilisés pour ces calculs sont ceux de la station d'essais d'Agonkanmey ; en milieu paysan, ces rendements sont assez variables (2 000 à 4 000 kg ha⁻¹ an⁻¹).

CHAPITRE IV

INFLUENCE DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS SUR LES PROPRIETES DU SOL

Ce chapitre présente les effets du *Mucuna* sur les caractéristiques morphologiques, physiques et chimiques générales du sol.

1- METHODOLOGIE

1.1- Prélèvements de sol

Le plan de prélèvement est consigné dans l'annexe II.1.

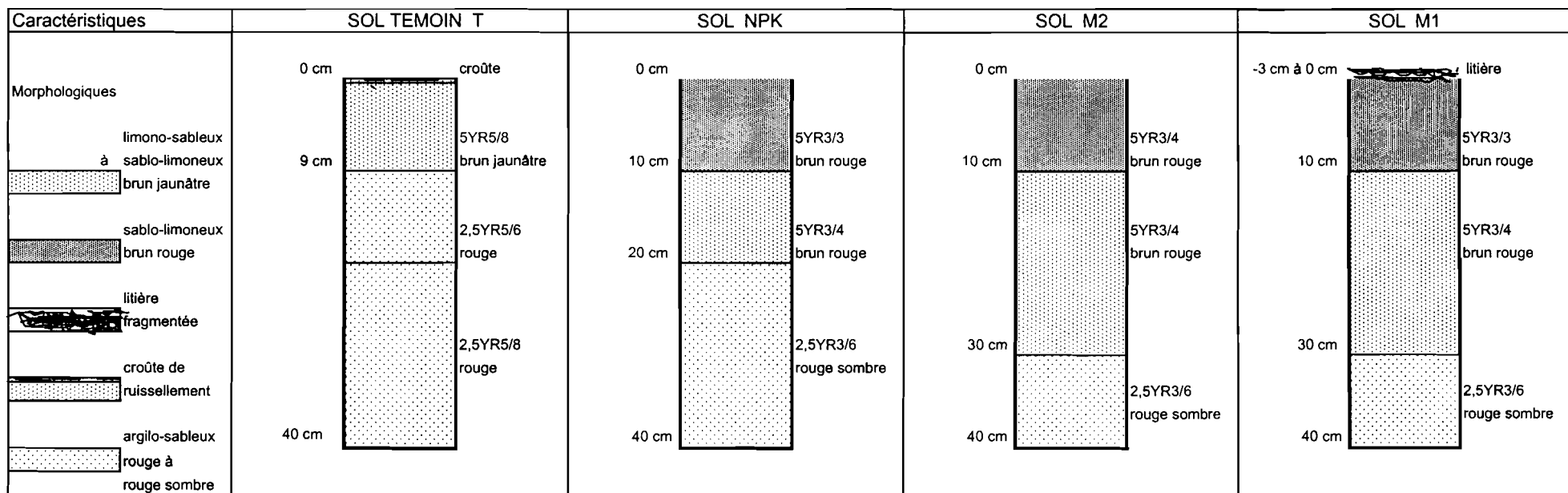
Chaque traitement correspond à une seule grande parcelle. Mais chaque parcelle a été divisée en 6 sous-parcelles dans le sens de la longueur (dimensions 30 m sur 1,33m), et chaque sous-parcelle est divisée en 10 mini-parcelles (3 m sur 1,33m). Ainsi, chaque grande parcelle est subdivisée en 60 mini-parcelles.

Les échantillons sont prélevés sur trois profondeurs 0-10, 10-20, 20-40 cm.

Pour les déterminations du Carbone organique (C) et de l'Azote total (N), de la granulométrie, du pH, des bases échangeables (BE) et de la capacité d'échange (CEC), les prélèvements sont effectués à la tarière dans toutes les mini-parcelles pour constituer dans chaque sous-parcelle 3 composites (amont, milieu et aval); soit 18 échantillons par profondeur et par parcelle en 1988 puis en 1996.

Pour la détermination de la densité apparente, des pF (2,5 et 4,2) et de l'humidité du sol, 17 prélèvements répartis au hasard sont faits dans chaque parcelle mais sont localisés dans les mêmes mini-parcelles. Ces prélèvements sont réalisés avec des anneaux pF hermétiquement fermés juste après prélèvement avant d'être amenés au laboratoire.

Figure IV.1 : Résumé des caractéristiques morphologiques des sols étudiés en 1995.



Au total par parcelle, 54 échantillons (18 x 3) de sol ont donc été prélevés tous les ans pour la détermination des caractéristiques physiques et chimiques des sols de 1988 à 1996, 51 échantillons (17 x 3) pour la détermination de la densité apparente et des pF (une seule fois durant tous les essais), et l'humidité des sols a été déterminée mensuellement.

1.2- Méthodes analytiques

La granulométrie est déterminée selon la méthode internationale avec la pipette Robinson.

La densité apparente (D_a , en g/cm^3) a été déterminée au moyen d'un cylindre de 95 cm^3 .

Les valeurs de l'humidité à pF_{2,5} et pF_{4,2} ont été déterminées à l'aide d'une presse à membrane.

Le carbone total (C) a été dosé par voie sèche à l'autoanalyseur CHN LECO et l'azote total (N) par la méthode KJELDAHL. Ces deux dosages sont faits sur des échantillons de sol séchés à l'air et finement broyés. Les résultats sont exprimés en $g\text{ C (ou N) } kg^{-1}\text{ sol}$.

Le stock (Q en $kg\text{ ha}^{-1}$) de C ou de N contenu dans une couche d'épaisseur e (dm) est obtenu par la formule suivante : $Q_{C,N} (t\text{ ha}^{-1}) = C,N(g\text{ kg}^{-1}\text{ sol}) \times e\text{ (dm)} \times D_a (g/cm^3)$.

dans laquelle D_a est la densité apparente et C les teneurs en carbone ou en azote exprimées en $g\text{ kg}^{-1}$ de sol.

Les bases échangeables et capacité d'échange sont déterminées par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH7.

2- RESULTATS

2.1- Hétérogénéité initiale des parcelles

Celle-ci a été présentée au chapitre II. Nous en rappelons simplement les principaux points.

En l'absence d'un dispositif en bloc permettant un traitement statistique adéquat, nous avons tenté de juger de l'hétérogénéité initiale du dispositif par l'analyse des mini-parcelles pour quelques caractéristiques du sol. Les résultats sont présentés dans le tableau II.4 pour la couche 0-10 cm. L'analyse statistique présentée ici correspond à 18 prélèvements par

traitement. L'étude détaillée a également été faite et a porté sur les taux de C et N total de 60 échantillons par traitement pour les couches 0-10, 10-20 et 20-40 cm (Tableaux II.5 et II.6).

Sans entrer dans le détail des valeurs, on constate :

- une faible variabilité intra-parcellaire pour la granulométrie, le pH et le complexe d'échange puisque les coefficients de variation (CV) sont généralement inférieurs à 10 %,
- une variabilité intra-parcellaire faible à moyenne des teneurs en C et N avec des coefficients de variation (CV) variant entre 2 et 17 %,
- une variabilité inter-parcellaire faible à moyenne du milieu initial, au regard des paramètres étudiés, puisque les différences pour chaque traitement aux valeurs moyennes du dispositif varient généralement entre 10 et 17 %.

2.1- Caractéristiques morphologiques du sol

Les caractéristiques morphologiques des sols décrits en 1996 sont schématisées sur la figure IV.1. Elles montrent que les traitements ont plus ou moins modifié la morphologie du sol.

Les descriptions portent sur la couche 0-40 cm .

- Traitement T (sous culture traditionnelle). On distingue trois horizons :

- 0-1 cm : Croûte de ruissellement limoneuse à structure litée,
- 1-9 cm : Horizon sablo-limoneux à structure particulaire avec de fines racines,
- 9-40 cm : Horizon argilo-sableux à structure polyédrique avec des racines fines.

-Traitement NPK (fertilisation minérale) et traitement M2 (Mucuna tous les deux ans).

Morphologie à peu près identique avec trois horizons :

- 0-10 cm : Horizon sablo-limoneux à structure particulaire à grumeleuse faible, feutrage, racinaire moyen
- 10-20 (ou 10-30) cm : Horizon sablo-limoneux à limono-sableux à structure particulaire, chevelu racinaire important,
- 20-40 cm : Horizon argilo-sableux à structure massive avec galeries de termites et trainées de turricules de vers de terre.

Tableau IV.1 : Porosité et eau utile dans les parcelles en 1996 entre 0 et 40 cm

Porosité %	Profondeurs	T	NPK	M2	M1
Porosité totale					
%					
	0-10 cm	46	47	46	50
	10-20 cm	42	42	42	46
		40	41	42	41
macroporosité					
%					
	0-10 cm	39	38,5	38,5	41,5
	10-20 cm	35,5	32,5	34,5	38,1
	20-40 cm	31	28	31,3	31,2
eau utile %					
	0-10 cm	2,4	1,7	2,1	2,6
	10-20 cm	1,8	2,5	1,9	1,8
	20-40 cm	2,8	2,5	3,1	3,6
pF 2,5					
	0-10 cm	6,9	8,5	7,5	8,5
	10-20 cm	6,5	9,5	7,6	7,9
	20-40 cm	9,4	13,0	10,7	9,8
pF 4,2					
	0-10 cm	4,5	6,8	5,4	5,9
	10-20 cm	4,7	7,0	5,7	6,1
	20-40 cm	6,6	10,5	7,6	6,2
Humidité %					
	0-10 cm	4,5	7,8	7,5	8,6
	10-20 cm	7,5	9,0	8,4	8,2
	20-40 cm	12,0	12,6	13,5	12,9

-Traitement M1 (*Mucuna* tous les ans), également trois horizons mais avec présence d'une litière :

3-0 cm : Litière fragmentée et partiellement décomposée

0-10 cm : Horizon sablo-limoneux à structure grumeleuse, forte porosité, feutrage racinaire important et présence de turricules de vers de terre,

10-30 cm : Horizon limono-sableux à sablo-limoneux à structure polyédrique, forte densité racinaire et galeries de termites,

30-40 cm : Horizon argilo-sableux à structure polyédrique, densité racinaire moyenne, galeries de termites et traînées de turricules de vers de terre.

La culture traditionnelle continue (T) a entraîné la formation d'une croûte de battance, alors que le système *Mucuna*-maïs aboutit à la formation d'une litière qui protège le sol contre l'érosion, l'évaporation et permet le développement d'un horizon de surface aux activités biologiques et au caractère humifère (couleur sombre) plus important.

Globalement, le caractère biologique et humifère des couches 0-20 cm varie dans le sens :

M1 > M2 = NPK > T

2.2- Caractéristiques physiques du sol

Les caractéristiques physiques des sols sont schématisées sur la figure IV.2 et le détail des résultats est consigné dans le tableau IV.1 et dans l'annexe IV.1.

- Taux d'argile + limons fins (A + Lf).

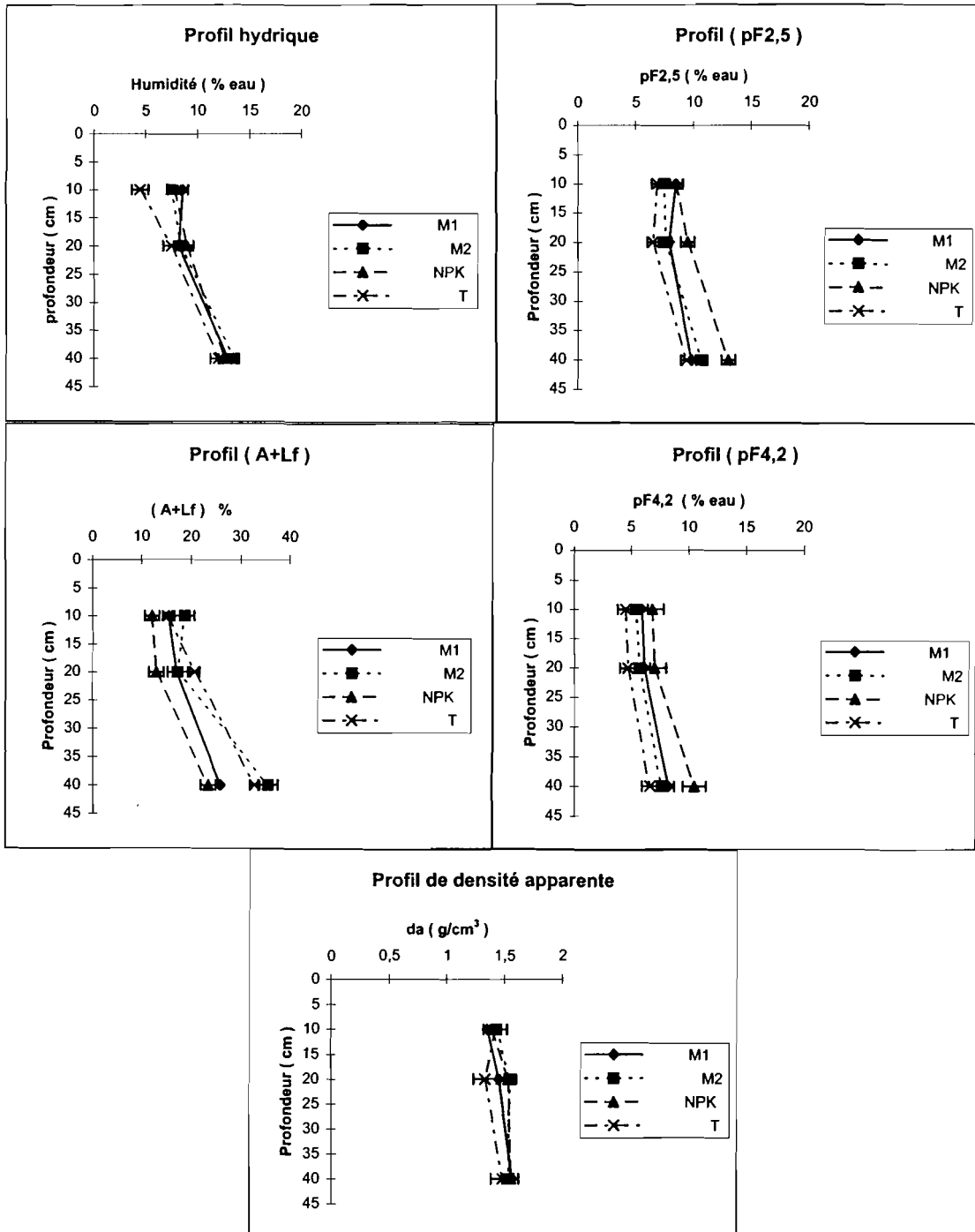
Les taux d'argile + limon fin (A + Lf, particules 0-20 μm) augmentent globalement de la surface à la profondeur. Il faut noter que les valeurs les plus faibles correspondent au traitement NPK et que le traitement T a des valeurs relativement élevées. Les variations entre 1988 et 1996 sont très faibles, laissant supposer l'absence de processus notable d'érosion en nappe.

- Densités apparentes (Da)

Les densités apparentes, à l'instar des taux d'argile + limon fin (A + Lf), augmentent de la surface en profondeur (1,35 à 1,55). Les valeurs les plus faibles (1,35 et 1,39) se situent dans la couche de surface qui est l'horizon de pénétration humifère aux activités biologiques

**Figure IV.2 : Influence des traitements sur les caractéristiques physiques des sols
(profil hydrique, A + Lf, pF et Da)
de 1988 à 1995.**

Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (Sx)



intenses ; les traitements M1 et NPK sont particulièrement marqués par cette caractéristique, tandis que pour le témoin, la densité apparente élevée (1,42) en surface atteint la valeur la plus forte 1,58) à 40 cm. Mais, globalement, il n'y a pas de variation importante de densités apparentes entre les traitements notamment pour les profondeurs de 10 à 40 cm.

- Porosité (P)

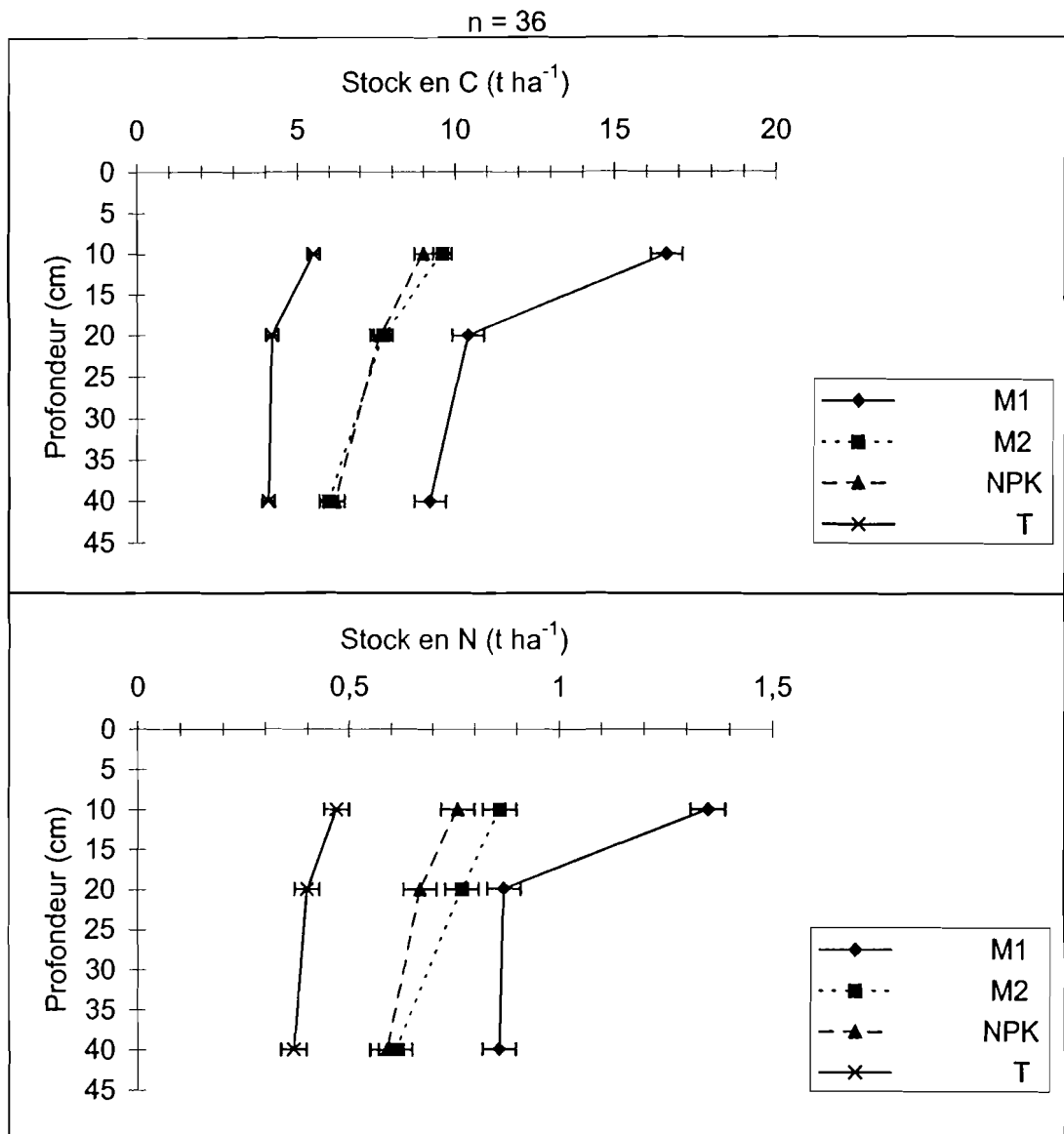
La porosité totale (Pt), $(Dr - Da) \times 100/Dr$ et la macroporosité (Pt - pF2,5), sont déduites des valeurs de la densité réelle (Dr), de la densité apparente (Da) et de l'humidité à la capacité de rétention (pF2,5). Les résultats sont consignés dans le tableau IV.1.

La porosité du sol, dans toutes les parcelles, diminue de la surface vers la profondeur. En surface, elle passe de 50 % dans le traitement M1 à 40 % dans le traitement T.

Elle est sensiblement plus élevée dans la couche de surface (0-10 cm), se maintient autour de 42 % dans les traitements M2, T et NPK mais continue de décroître vers la profondeur dans M1 et seul, le traitement M1 entraîne une porosité plus profonde (0-20 cm) variant entre 46 et 50 %.

A 40 cm de profondeur, la différence entre la porosité des parcelles devient faible. Néanmoins, le traitement T enregistre la porosité la plus faible (40% à 40 cm) et par conséquent la compacité la plus élevée.

Figure IV.3 : Profil des stocks de C et N totaux selon les traitements en 1995
 Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (Sx)



- Humidité

L'humidité pondérale du sol a été mesurée du 15 mars au 15 septembre au cours des années 1995 et 1996. Nous en présentons ici les valeurs moyennes (Tableau IV.1), les coefficients de variation étant présentés en annexe IV.1. Cette période a connu une distribution pluviométrique normale mais avec une légère diminution du total annuel par rapport à la moyenne annuelle de la station. Toutes profondeurs confondues, les valeurs d'humidité varient de 4,5 à 13,5 %. Elles augmentent généralement avec la profondeur. Elles sont très proches pour l'ensemble des traitements à l'exception de la couche de surface du témoin où l'on observe une valeur très faible. Ceci peut être dû à une évaporation forte en absence de couverture du sol. Pour les traitements NPK, M2 et M1 les humidités sont proches de celles à pF2,5 en surface, mais sont généralement supérieures à cette valeur en profondeur.

On considère que l'humidité à pF4,2 est fortement déterminée par la texture du sol tandis que celle à pF2,5 serait aussi influencée par la structure. Ici, dans les deux cas, on note un sens de variation identique à celui de la texture. Il est toutefois intéressant de constater que le sol témoin qui était le plus argileux est celui dont les humidités sont les plus faibles. Ceci est probablement dû à une modification, à toutes les échelles de porosité, de l'organisation de la structure en relation avec les teneurs en MO (C) des échantillons.

- Eau utile

Les valeurs de l'eau utile sont présentées dans le tableau IV.1.

Elles sont pour la plupart plus faibles entre 10 et 20 cm et relativement plus élevées entre 0-10 cm et 20-40 cm. Elles paraissent plus influencées par la texture dans cette dernière couche.

2.3- Caractéristiques chimiques du sol

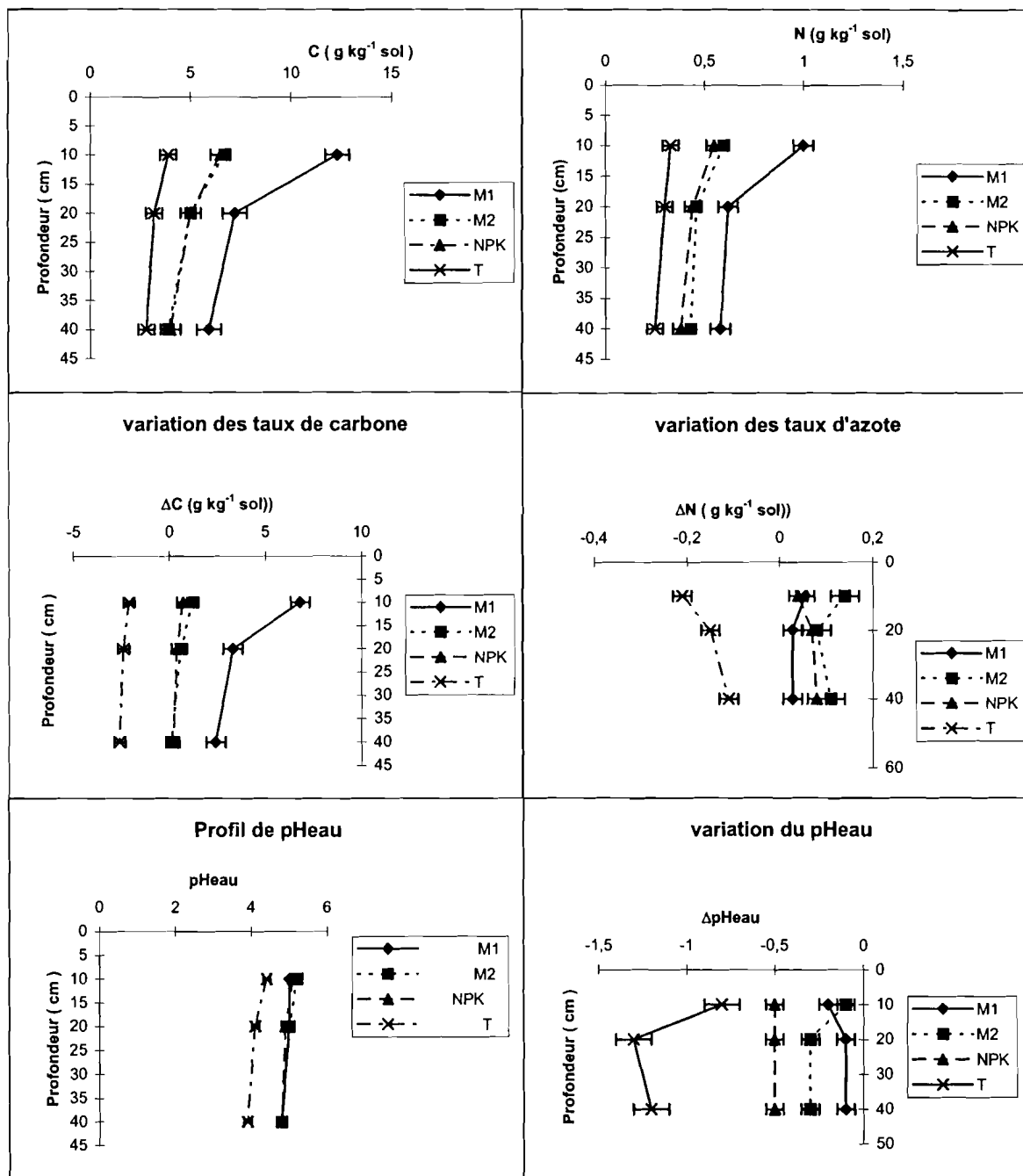
- Stocks et teneurs en matière organique (C et N) des sols

Les figures IV.3 et IV.4 présentent les profils des stocks et teneurs en carbone (C) organique et azote (N) totaux et les annexes IV.2 et IV.3, les détails des stocks en fonction des traitements.

Les stocks de C et N diminuent vers la profondeur et le sens de variation entre traitements est

Figure IV.4 : Influence des traitements sur les profils de C, N et pH dans les sols de 1988 à 1995.

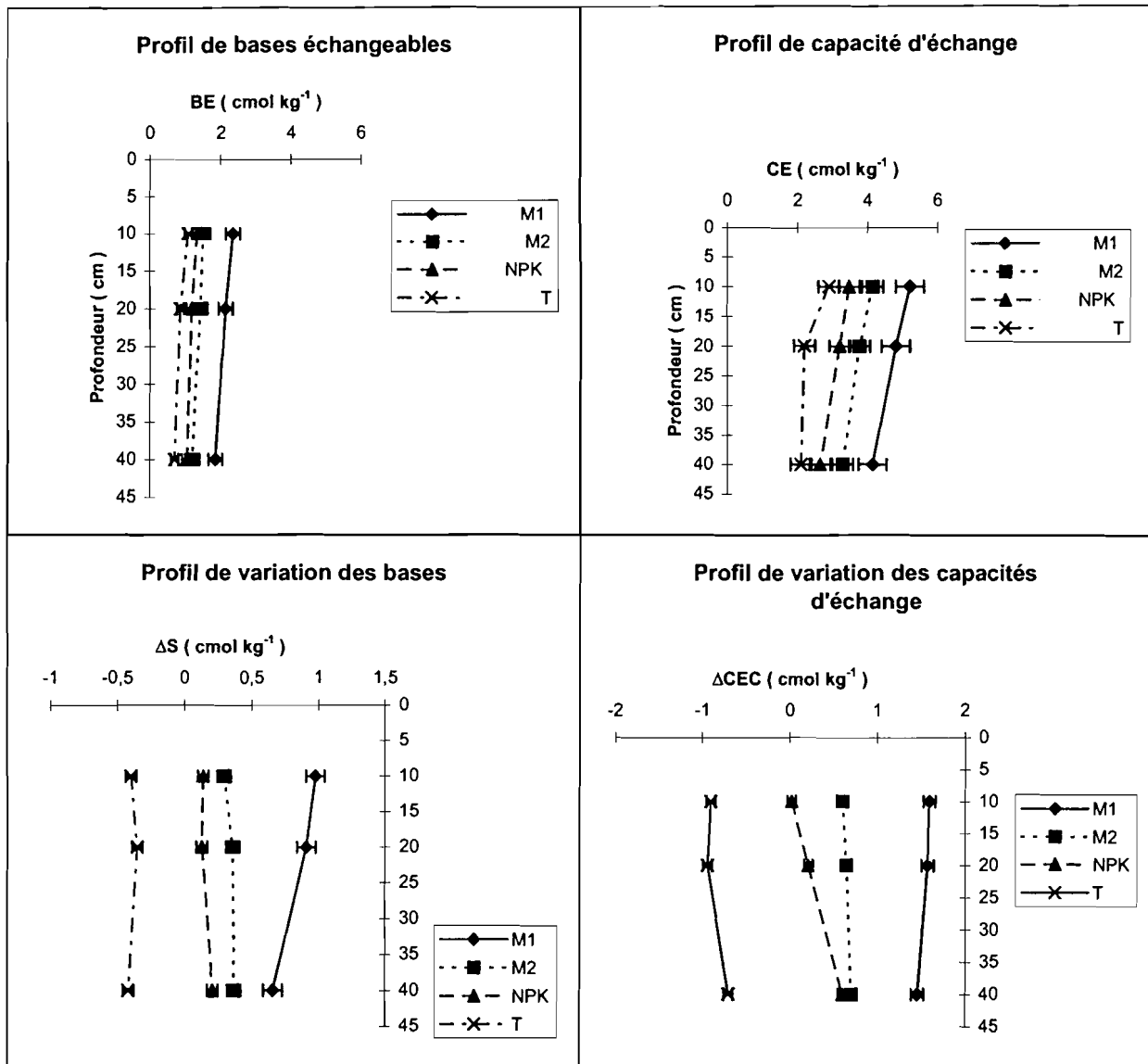
Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (Sx)



$$\Delta ((C, N, pH)) = (C, N, pH)_{1995} - (C, N, pH)_{1988}$$

Figure IV.5 : Influence des traitements sur les bases échangeables et la capacité d'échange de 1988 à 1995.

Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (Sx)



$$\Delta (S,CEC) = (S,CEC)_{1995} - (S,CEC)_{1988}$$

$M1 > M2 \geq NPK > T$.

De 1988 à 1996, les stocks et teneurs en C et N ont diminué pour T, légèrement augmenté pour M2 et NPK et fortement augmenté pour M1 (Fig. IV.4). Le système *Mucuna*-maïs répété tous les ans (M1) conduit à une forte augmentation des stocks de C des horizons de surface, avec pratiquement une différence de 10 t C ha^{-1} entre les traitements T et M1. En 8 ans (avec $D_a = 1,35$), l'augmentation des stocks de C (Annexe IV.3) est de $14 \text{ t C ha}^{-1} 20\text{cm}^{-1}$ dans M1 pour des apports (restitutions) de $13 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, soit $104 \text{ t C ha}^{-1} 8 \text{ ans}^{-1}$ correspondant à un taux d'humification de 13,5 %.

Les rapports C/N, tous traitements confondus, varient globalement de 10,2 à 12,3 témoignant d'une bonne évolution de la matière organique dans ces sols. Ils sont un peu plus élevés en surface qu'en profondeur ; et toutes profondeurs confondues, le sens de variation est le suivant : $M1 > NPK > T > M2$. Ils sont plus élevés pour le traitement M1 compte tenu de la forte restitution organique du *Mucuna*.

-Le complexe d'échange

Les valeurs du complexe d'échange (bases échangeables et capacité d'échange) et leurs variations sont consignées dans les annexes IV.2 et IV.3 et schématisées sur la figure IV.5.

*** Les bases échangeables (BE)**

La somme des bases échangeables suit des variations similaires à celles décrites pour la CEC, aussi bien pour les valeurs absolues que pour les modifications de 1988 à 1996. Elle diminue avec la profondeur dans tous les traitements envisagés. D'autre part, si l'on compare les valeurs des bases échangeables de 1988 à celles de 1996, on constate, à l'exception du témoin dont les valeurs diminuent de $1,49$ à $1,09 \text{ cmol kg}^{-1}$ en surface, une nette augmentation aussi bien dans la couche 0-10 cm qu'entre 10 et 40 cm. L'augmentation est la plus forte en surface dans le traitement M1, passant de $1,37$ à $2,35 \text{ cmol kg}^{-1}$ de sol alors que, dans les traitements M2 et NPK, les valeurs passent de $1,21$ à $1,51 \text{ cmol kg}^{-1}$ et de $1,2$ à $1,34 \text{ cmol kg}^{-1}$ respectivement.

Le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) sont les cations échangeables qui varient le plus entre 1988 et 1996. Le Ca augmente de 75 % dans M1, 20 % dans M2 et 31 % dans NPK tandis que l'accroissement de Mg est de 42 % pour M1, 35 % pour M2 et 8 % pour NPK.

* La capacité d'échange (CEC)

Elle varie dans le même sens que la somme des bases échangeables. Elle diminue avec la profondeur, elle est plus élevée en surface avec de 1988 à 1996 avec un accroissement plus élevé pour le traitement M1 (30 %) que pour M2 (14 %) et NPK (6 %).

- Le pH eau.

Tous traitements confondus, le pH eau des sols en 1988 était moyennement à fortement acide variant de 5,6 à 5,1. De 1988 à 1996, on note une baisse du pH pour tous les traitements. Cette baisse est faible (0 à 0,3 unités pH) pour les traitements M1 et M2, moyenne (0,5 unités pH) pour NPK et forte (0,7 à 1,3 unités pH) pour T. Les traitements avec *Mucuna* contribuent donc à une limitation de l'acidification lors de cultures annuelles continues.

3- DISCUSSIONS

3.1- Effet des traitements sur les caractéristiques morphologiques et physiques des sols

Tous les traitements ont plus ou moins modifié la morphologie des sols et particulièrement la couche de surface 0-10 cm.

Dans la culture traditionnelle continue, la faible couverture des sols se traduit par la formation des croûtes superficielles (CASENAVE et VALENTIN, 1988) avec comme conséquence un risque d'érosion en nappe (LAL, 1997). Toutefois, ici, ce risque semble avoir été limité si l'on en juge par les teneurs en A + Lf qui n'ont pas été modifiées entre 1988 et 1996.

Dans le traitement M1, l'effet de la légumineuse de couverture (*Mucuna*) se traduit par la présence d'une litière fragmentée, une forte activité biologique dans l'horizon de surface, activité due entre autres aux vers de terre alors que la présence de ce groupe faunique est moins marquée dans les autres traitements. Il en résulte une structure grumeleuse et une forte macroporosité apparente. Paillage et modification de la structure conduisent à une humidité en surface plus élevée dans le traitement M1 que dans les autres traitements. De même, KOTHANDARAMAN (1989), a pu montrer qu'après 3 années de *Mucuna bracteata*,

l'humidité du sol était augmentée très sensiblement (8% - 11%). Bien que non étudié ici, on peut aussi penser que la stabilité de l'agrégation a été nettement améliorée avec le traitement M1 par suite des fortes augmentations des teneurs en C du sol (FELLER et al., 1996, BARTHES et al., 1996).

3. 2 - Effet des traitements sur le statut organique (C,N) et les autres propriétés chimiques du sol

La culture traditionnelle continue entraîne un appauvrissement du sol en C et N. Ce phénomène est bien connu en milieu tropical (BOYER, 1970 ; SANCHEZ, 1976 ; ROOSE, 1981 ; SEDOGO, 1981 ; PIERI, 1989 ; FELLER et BEARE, 1997).

Le système M1 apporte chaque année 13,1 t ha⁻¹ de carbone. Si l'on compare ces stocks restitués à l'accroissement annuel du taux de carbone (1,75 t ha⁻¹) dans les 20 premiers centimètres, on peut en déduire un taux d'humification de 13,5%, soit un coefficient de minéralisation de 86,5%. LARSON et al. (1972) cités par TRIOMPHE (1996) trouvent en condition de pluviométrie plus élevée, un coefficient de 10%.

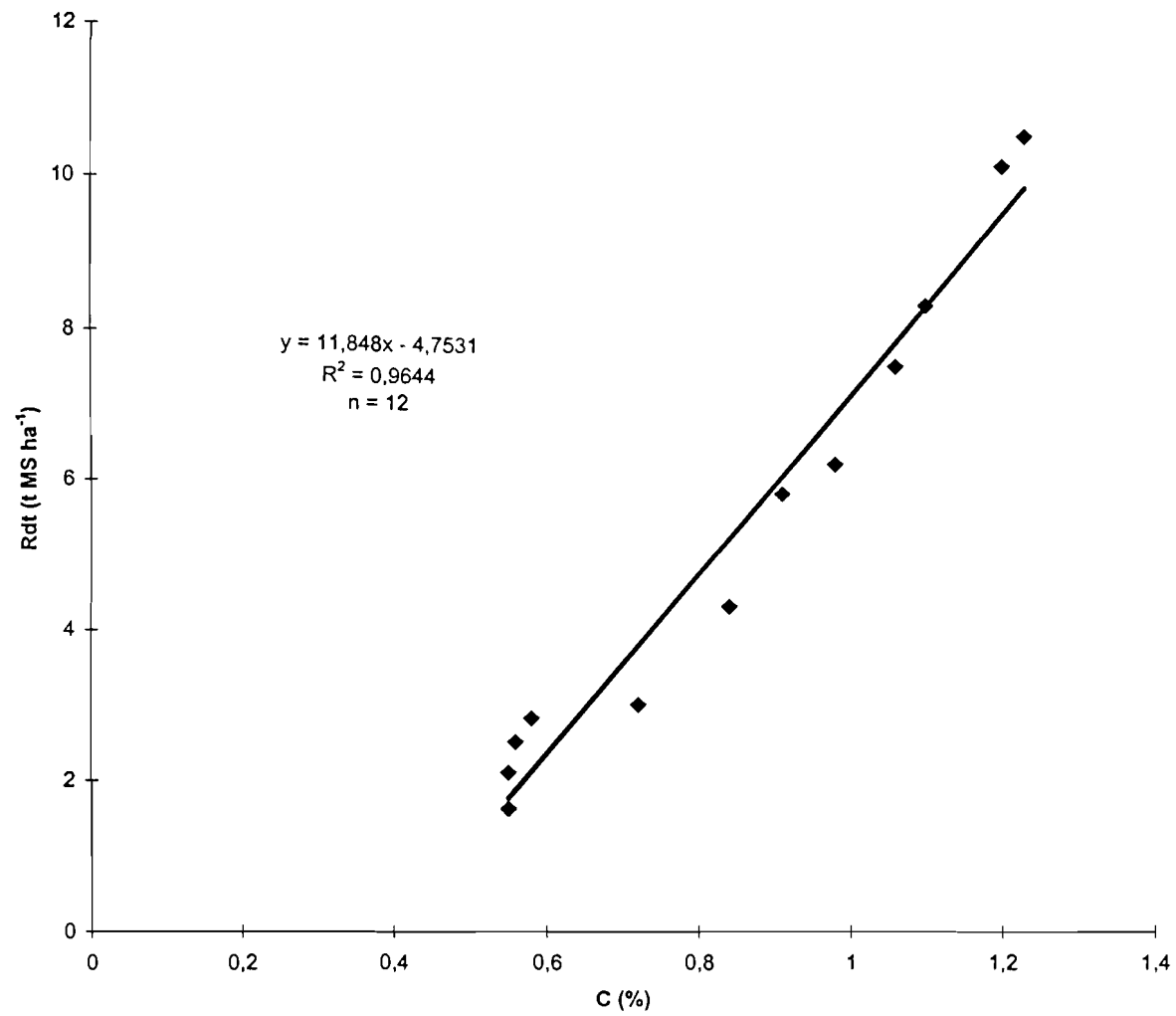
Cette augmentation des teneurs en C avec le traitement M1, s'accompagne de celles des teneurs en N, de la capacité d'échange et des teneurs en bases échangeables, ainsi que d'une limitation de l'acidification et donc de la libération d'ions toxiques comme Al₃⁺ et Mn₂⁺ (PHILLIPS et PHILLIPS, 1984). Tous traitements confondus, on observe que toutes les variations de ces données vont dans le même sens que celles des teneurs en C, ce qui est en accord avec les résultats de nombreux auteurs (FAUCK et al., 1969 ; BOYER, 1970 ; CHARREAU et NICOU, 1971 ; CHARREAU, 1972 ; PICHOT, 1974 ; SIBAND, 1974 ; SEDOGO, 1981 ; PIERI, 1985 ; GEIGER et al., 1992 ; FELLER, 1995).

Cet ensemble d'amélioration des propriétés des sols doit contribuer aussi, à côté du niveau des restitutions, à améliorer la productivité végétale du maïs (COULTAS, 1996).

4- CONCLUSION

Les résultats obtenus au cours des essais montrent que les systèmes de culture développés à travers les traitements M1, M2, NPK et T peuvent entraîner des modifications plus ou moins

Figure IV.6 : liaison entre les rendements en MS et les taux de C



importantes non seulement de la productivité des sols mais également de leurs caractères morphologiques et physico-chimiques. Ces différences sont liées à celles des stocks de C du sol, elles-mêmes dépendantes du niveau des restitutions organiques.

Mais il a été aussi constaté qu'un effet cumulatif a lieu et qu'en 8 ans les rendements augmentent fortement pour les traitements M1, M2 et NPK, en même temps d'ailleurs que de nombreuses propriétés du sol. Ceci montre bien que la forte amélioration des propriétés édaphiques contribue, à moyen et long terme, à une augmentation de la productivité végétale.

Le système *Mucuna*-maïs donne 72,4% de revenu supplémentaire minimal annuel par rapport à la culture traditionnelle (début d'essais), un surplus de bénéfice correspondant à 36% et 48% des revenus obtenus dans les systèmes NPK et M2 respectivement. Cela explique l'engouement des paysans dans la pratique de ce système.

De nombreuses caractéristiques du sol pourraient être considérées ici comme des « indicateurs » de cette amélioration de la fertilité. Parmi ceux-ci, la teneur en MO, sans être un paramètre explicatif, constitue ici un bon indicateur.

Enfin, on doit signaler, en relation avec les problèmes actuels de changement globaux liés à l'émission de gaz à effet de serre, et avec la recherche de systèmes sol-plante fonctionnant comme des « puits » de C, que le système *Mucuna*-maïs paraît remarquablement performant.

En effet, des liaisons établies entre les rendements en MS (tous traitements confondus) et quelques caractéristiques chimiques de la couche de surface (0-10 cm) du sol telles que, C total, N total, Ca, Mg, K, Na, S et CEC, font ressortir que la liaison « rendement (Rdt)-C » est la plus forte. Les coefficients de corrélation varient dans le sens :

Rdt-C ($r = 0,9820$) > Rdt-CEC ($r = 0,9817$) > Rdt-N ($r = 0,9800$) > Rdt-S ($r = 0,9716$) >
Rdt-Ca ($0,9630$) > Rdt-Mg ($r = 0,9566$) > Rdt-K ($r = 0,8921$) > Rdt-Na ($r = 0,8014$).

La liaison entre le rendement et le carbone est schématisée sur la figure IV.6.

Toutes ces observations d'ordre agronomique et environnemental sur l'importance de la MO dans ces sols de terres de barre, justifient la poursuite de son étude détaillée à travers son fractionnement physique et sa minéralisation.

TROISIEME PARTIE

(LES MECANISMES DES VARIATIONS)

INFLUENCE DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS SUR LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE ET DE L'AZOTE

Cette troisième partie est organisée en deux chapitres.

Le chapitre V concerne les formes de C et N organiques impliquées dans la dynamique interannuelle de la MO du sol. La MO du sol est étudiée par fractionnement granulométrique.

Le chapitre VI concerne la dynamique de l'azote minéral (prélèvements au champ) et l'évaluation de l'azote potentiellement minéralisable (par incubation en laboratoire).

CHAPITRE V

EFFETS DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS SUR LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE

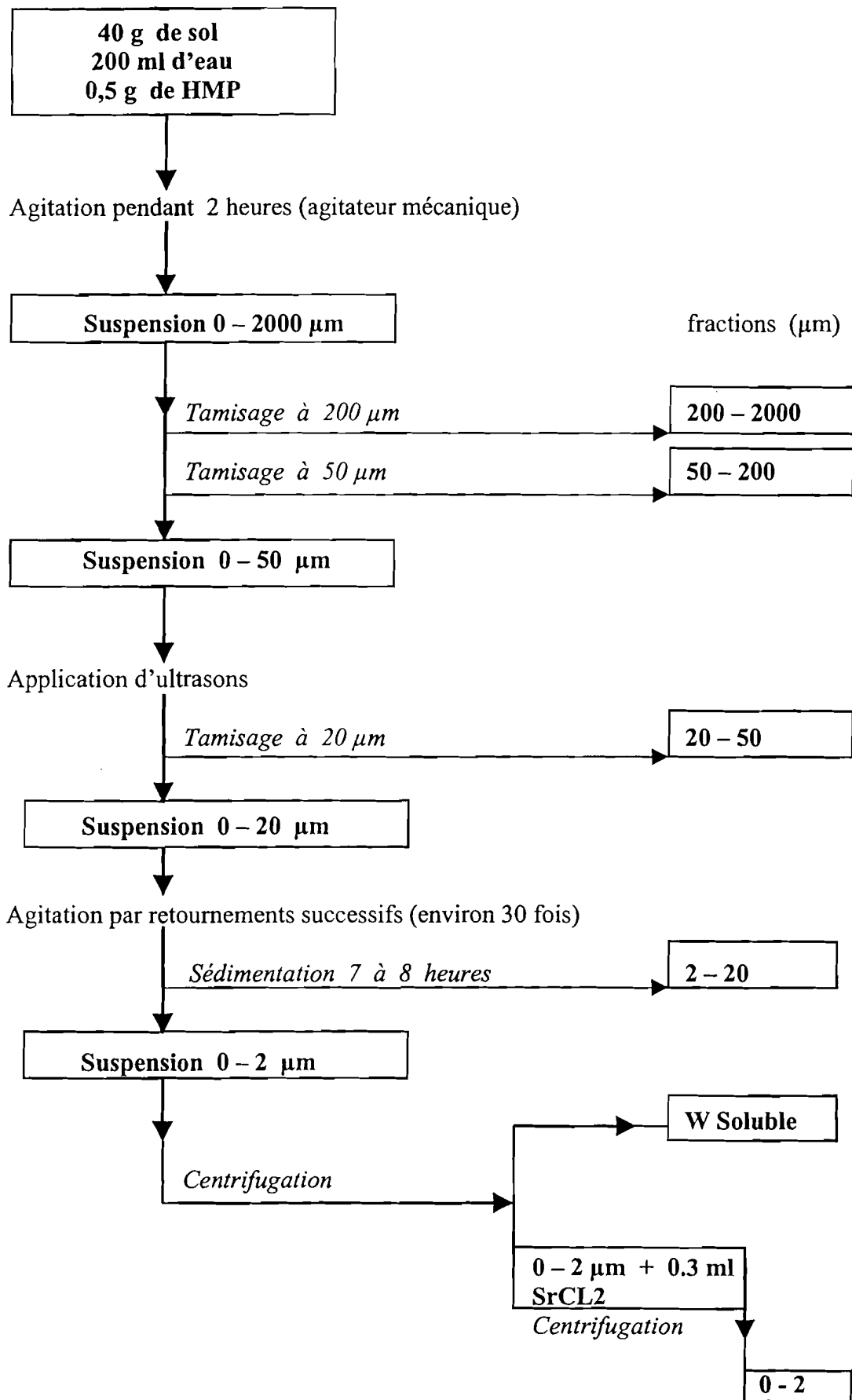
Dans la deuxième partie, nous avons constaté que l'association du *Mucuna* avec le maïs induit une productivité plus élevée, augmente le niveau des restitutions organiques et minérales au sol et améliore diverses caractéristiques physiques et chimiques des horizons de surface du sol. Il a été constaté que la MO joue un rôle important dans ces propriétés. La présente étude vise à préciser les compartiments organiques impliqués dans les variations de MO observées. Ces compartiments seront étudiés par une méthode de fractionnement granulométrique du sol.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Rappel

Le dispositif expérimental, les traitements, les caractéristiques du *Mucuna*, les modes de prélèvements, les dosages des teneurs en C et N totaux et le calcul des stocks en C et N ont déjà été présentés dans la deuxième partie de ce document.

Figure V. 1 : Schéma du fractionnement granulométrique de la matière organique



Le fractionnement granulométrique de la MO du sol et l'analyse mécanique

- Aperçu bibliographique

De nombreux auteurs ont utilisé ce type de fractionnement parmi lesquels : EDWARDS et BREMNER (1967), FELLER (1979), FELLER et al. (1991a), GRAVINELLI et al. (1995), ANDREUX et al. (1980), BRUCKERT et KILBERTUS (1980), BALEDENT et al. (1991), CHRISTENSEN (1992), FELLER (1995).

Selon ces auteurs, les points forts de cette technique sont de trois ordres :

- elle est facile à mettre en oeuvre,
- elle est peu dénaturante
- elle permet d'étudier la dynamique des différents types de matières organiques.

Ces différents arguments justifient le choix du fractionnement granulométrique pour la caractérisation de la matière organique du sol.

La méthode utilisée est celle appelée HMP/US (FELLER et al., 1991a). Elle fait intervenir une dispersion préalable par l'hexamétaphosphate de sodium (HMP) sur le sol total suivie d'une dispersion supplémentaire par l'application d'ultrasons (US) sur la suspension 0-50 μm .

- Le fractionnement granulométrique (Figure V.1)

Le protocole opératoire est le suivant :

L'échantillon de sol 0-2 mm (40 g) est mis dans un flacon de 250 ml, agité dans 200 ml d'eau avec 0,5 g de d'hexamétaphosphate de sodium (HMP), et cinq billes d'agate de 1 cm de diamètre pendant deux heures sur un agitateur rotatif avec une fréquence de 50 révolution par minute.

*** Fractions > 20 μm**

La suspension de sol obtenue est passée successivement à travers des tamis de 200 et 50 μm . Les fractions (>200 et >50 μm) se trouvant sur les tamis sont bien rincées à l'eau permutée. L'eau de rinçage est jointe aux eaux de fractionnement. La suspension 0-50 μm est traitée aux ultrasons pendant 10 mn (70% de cycle actif, puissance de sortie 9, sur High Intensity Ultrasonic Processor 600 W), puis elle est tamisée à 20 μm .

*La fraction 20-50 μm et les eaux de rinçage sont ajoutées à la suspension 0-20 μm . Celle-ci est ensuite transférée dans des allonges de 1 litre et complétée avec de l'eau.

Les 3 fractions 2000-200 μm , 200-50 μm et 50-20 μm obtenues par tamisage, sont séchées à 60°C jusqu'à obtention d'un poids constant, puis pesées et broyées.

* Fractions < 20 μm

Fraction 0-2 μm : Le prélèvement de la fraction 0-2 μm est fait par siphonage jusqu'à son épuisement total (5 à 6 prélèvements suivant la teneur en argile des suspensions de sol). Après chaque siphonage, la suspension est ramenée à 1 litre. La totalité de la suspension d'argile prélevée est floculée par SrCl_2 , centrifugée dans une centrifugeuse de type BECKMAN, avec une vitesse de 10.000 révolutions par minute, pendant 30 minutes. Une prise de 10 ml de surnageant est faite à chaque prélèvement pour le dosage ultérieur du carbone hydrosoluble. La fraction 0-2 μm obtenue est ensuite séchée à 60°C, pesée et broyée.

*Fraction 2-20 μm : elle correspond aux particules restant dans le fond de l'allonge après le dernier siphonage. Elle est recueillie et mise directement à l'étuve à 60°C, puis pesée et séchée.

Ce fractionnement granulométrique de la MO a été appliqué à 8 échantillons composites de sol (couches 0-10 et 10-20 cm des traitements M1, M2, NPK et T).

On a réalisé aussi une analyse mécanique (AM) du sol impliquant une oxydation de la MO de l'échantillon pour favoriser sa dispersion. Les différences de protocole avec le fractionnement granulométrique de la MO (FGMO) sont les suivantes (GAVINELLI et al, 1995) :

- prise de 20 g de sol au lieu de 40 g
- destruction de la MO par H_2O_2
- application des ultrasons sur l'échantillon total après oxydation de la MO et non seulement sur les fractions <50 μm comme c'est le cas pour FGMO (identique à celui décrit ci-dessus pour MO).

1.2- Dosage de l'humidité

L'humidité des échantillons de sol 0-2 mm est mesurée à l'étuve après séchage à l'étuve à 60°C jusqu'à poids constant.

1.3- Détermination du carbone et de l'azote

Les prises d'échantillon sont généralement de 15 à 20 mg et jusqu'à 100 mg pour les fractions sableuses pauvres en MO.

- Sur fractions solides

Le carbone et l'azote sont dosés par un analyseur élémentaire EA 1108 W (FISONS).

- Principe de détermination

L'échantillon à analyser est mis dans une petite capsule d'étain et est introduit automatiquement dans un réacteur constitué par un tube vertical en quartz maintenu à 1020°C et dans lequel passe un courant d'hélium constant. Une fois l'échantillon introduit, le courant d'hélium est automatiquement enrichi par une quantité déterminée d'oxygène pur, provoquant ainsi la combustion éclair de la capsule et de l'échantillon. Entraînés par le courant d'hélium, les gaz de combustion passent sur un catalyseur d'oxydation qui les transforment en CO₂, H₂O, N_xO_y....

Les produits qui ne sont pas dosés sont piégés. Ces gaz passent sur un deuxième catalyseur (cuivre réduit) qui va réduire les oxydes d'azote en azote élémentaire et piéger l'excès d'oxygène. On trouve alors à la sortie du tube, en plus du gaz vecteur (hélium), les gaz CO₂, N₂, H₂O etc. Les gaz ainsi obtenus sont séparés par une colonne de chromatographie et quantifiés par un détecteur à conductibilité thermique. Le signal obtenu est amplifié, puis envoyé à un enregistreur-intégrateur. L'utilisation de la technique d'étalon externe permet de calculer la teneur des éléments dosés.

- Sur fractions solubles

Le carbone organique soluble est dosé par un analyseur de carbone Shimad Z4 TOC 5000/5050. L'échantillon liquide est oxydé dans un four chauffé à 680°C en présence d'un

Figure V.2 : Variation interannuelle des teneurs (g kg^{-1}) en C total dans la couche 0-10 cm du sol selon les traitements.

Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (Sx)

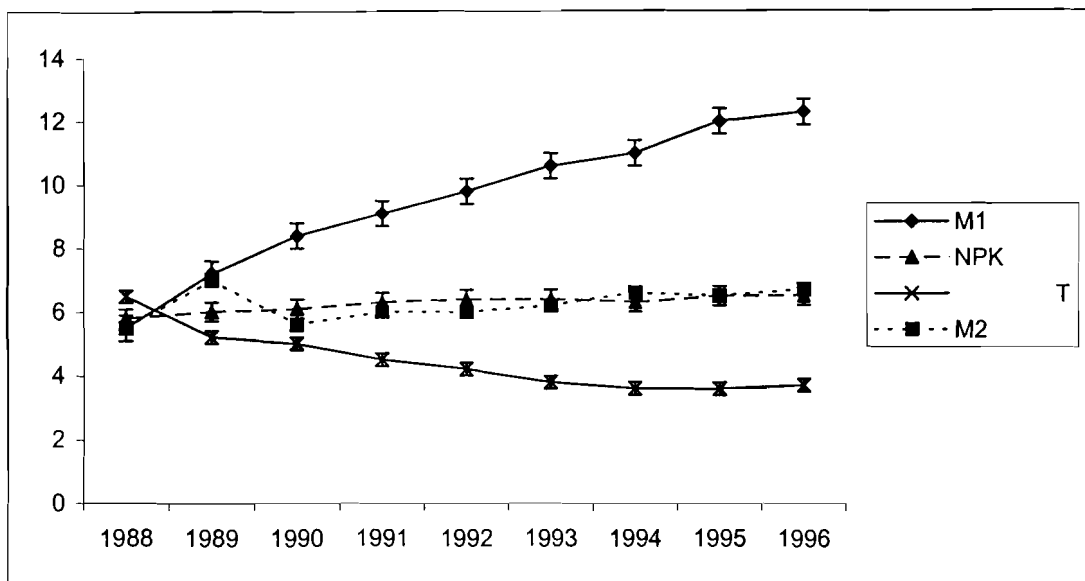
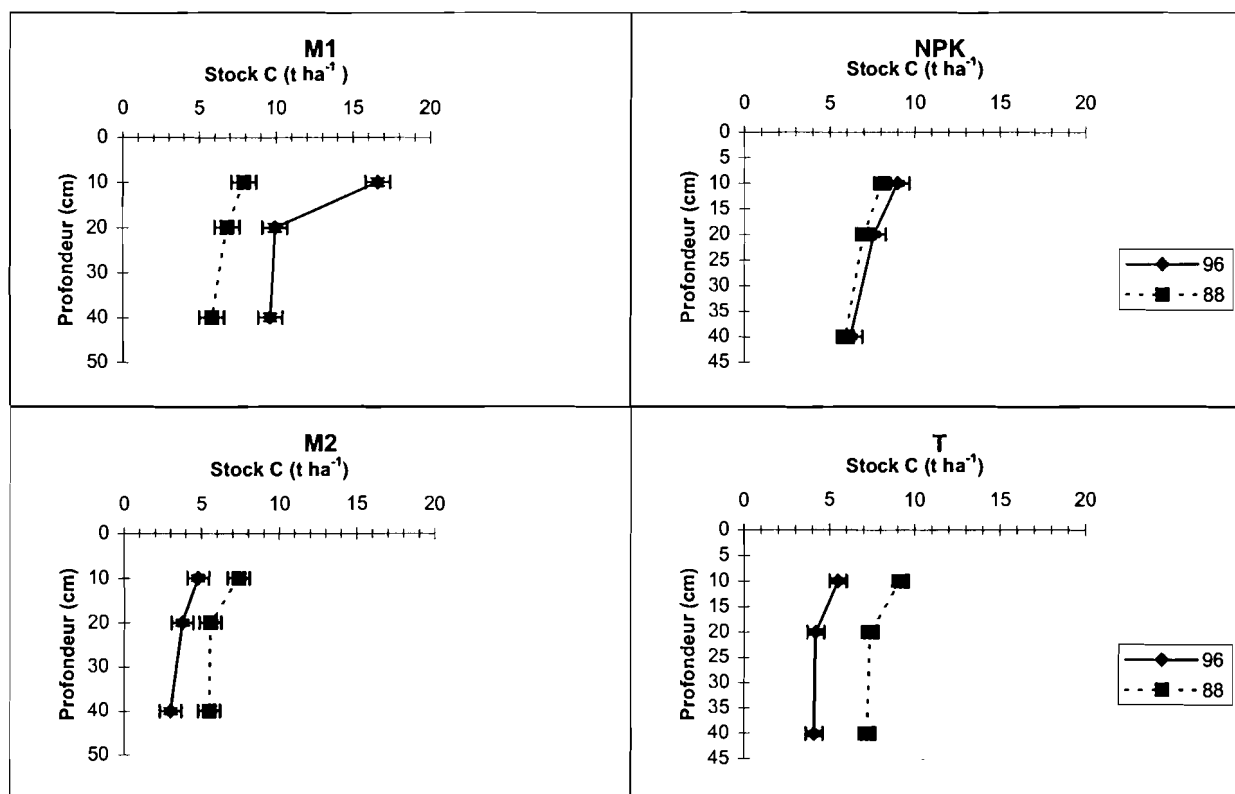


Figure V.3 : Evolution des stocks de carbone (t ha^{-1}) de 1988 à 1996.



catalyseur de platine. La mesure de CO₂ dégagé se fait par un détecteur infrarouge non dispersif.

L'azote soluble est dosé par colorimétrie (réaction de Berthelot) après attaque par la méthode Kjeldhal.

2. RESULTATS

2. 1. Variations interannuelles (1988-1996) et évolution dans le profil des teneurs et stocks de carbone total du sol

Les variations des teneurs en carbone de 1988 à 1996 sont schématisées sur les figures V.2 et V.3. Tous traitements confondus, la teneur en C du sol, augmente de 1988 à 1996 pour les traitements M1, M2 et NPK en croissant de 5,5 à 12,3 g kg⁻¹ de sol pour M1, 5,5 à 6,7 g kg⁻¹ de sol pour M2 et 5,8 à 6,5 g kg⁻¹ de sol pour NPK. Pour T, on note une diminution de 6,5 à 3,4 g kg⁻¹ de sol. Les stocks de carbone (tableau V.1), plus élevés en surface (16,6 t ha⁻¹, 11,9 t ha⁻¹, 11,3 t ha⁻¹ et 6,2 t ha⁻¹ pour M1, M2, NPK et T respectivement), diminuent vers la profondeur (9,9 t ha⁻¹, 9,1 t ha⁻¹, 9,2 t ha⁻¹ et 5,1 t ha⁻¹ dans l'épaisseur 10-20 cm et 9,6 t ha⁻¹, 7,8 t ha⁻¹, 7,0 t ha⁻¹ et 5,4 t ha⁻¹ respectivement dans les 10 cm suivants du sol). L'ordre de variation des taux et stocks de carbone dans le sol selon les traitements est le suivant :

$$M1 > NPK \geq M2 > T.$$

2. 2 - Fractionnement granulométrique de la matière organique du sol

Les résultats détaillés du fractionnement granulométrique (FGMO) et de l'analyse mécanique (AM) sont rassemblés dans les tableaux V.3 - V.5

Tableau V.1 : Teneurs (g C kg⁻¹) et stocks (t C ha⁻¹-1) de carbone total selon la profondeur et les traitements

Année 1995

Profondeurs	Traitements	teneurs C (gC kg ⁻¹ sol)	da (g cm ³ ⁻¹)	stocks C (t ha ⁻¹)	pHeau
0-10 cm					
	M1	12,3 ± 0,73	1,35	16,6 ± 1,2	5,0 ± 0,1
	M2	8,2 ± 0,52	1,43	11,9 ± 0,6	5,2 ± 0,1
	NPK	8,1 ± 0,51	1,39	11,3 ± 0,7	5,1 ± 0,1
	T	4,3 ± 0,23	1,42	6,2 ± 0,6	4,8 ± 0,1
10-20 cm					
	M1	6,9 ± 0,38	1,45	9,9 ± 0,7	5,0 ± 0,1
	M2	5,9 ± 0,32	1,54	9,1 ± 0,6	5,0 ± 0,1
	NPK	6,0 ± 0,42	1,53	9,2 ± 0,7	4,9 ± 0,1
	T	3,9 ± 0,22	1,53	5,1 ± 0,6	4,1 ± 0,1
20-40 cm					
	M1	6,2 ± 0,34	1,56	9,6 ± 0,6	4,8 ± 0,1
	M2	5,1 ± 0,27	1,53	7,8 ± 0,5	4,8 ± 0,1
	NPK	4,5 ± 0,23	1,55	7,0 ± 0,5	4,8 ± 0,1
	T	3,7 ± 0,21	1,58	5,4 ± 0,6	3,9 ± 0,1

Tableau V.2 Bilans en masse, carbone et azote, après analyse mécanique et fractionnement granulométrique de la matière organique. Somme des fractions organiques en % du sol non fractionné.

Année 1995

Profondeurs (cm)	Traitements	Analyse mécanique masse	Fractionnement de la matière organique		
			masse	Carbone	Azote
0-10 cm	M1	96,9	99,64	90,2	93,3
	M2	100	101,14	104,5	102,4
	NPK	99,07	100,7	89,6	81,2
	T	99,52	99,62	110,7	93,3
10-20 cm	M1	97,74	99,42	100,2	96,2
	M2	99,69	99,26	103	104,3
	NPK	99,44	99,6	105,3	98,3
	T	99,9	99,39	96,6	92,5
20-40 cm	M1	nd	99,03	95,9	97,6
	M2	nd	99,56	90	99,4
	NPK	nd	100,01	94,8	111
	T	nd	100,09	99,2	108,6

2. 2. 1 - Bilans en masse, carbone et azote .

Les bilans en masse carbone et azote sont résumés dans le tableau V.2.

Tous traitements et horizons confondus, les bilans massiques pour l'analyse mécanique (AM) et le fractionnement granulométrique (FG) sont compris entre 97 et 101% (moyenne de 99,4%).

Les bilans en C sont compris entre 89,6 et 110,7 % (moyenne de 98,8 %), tandis que ceux en azote montrent une variabilité plus forte, comprise entre 81 et 111% (moyenne de 98%).

Ces bilans en C et N sont tout à fait acceptables pour ce type de fractionnement et pour des échantillons, en particulier ceux de profondeur aux teneurs totales en C et N relativement faibles.

L'importance pondérale de la fraction grossière est à peu près la même dans les traitements M2 et NPK tandis qu'elle est largement dominante dans M1 et faible dans T. Par contre, On note pour M1 et NPK des pourcentages massiques de la fraction inférieure à 2 μ m nettement plus faibles que pour M2 et T.

2. 2. 2 - Estimation de l'état de dispersion de la matière organique

Pour estimer l'état de dispersion des particules de sol après fractionnement, les masses des fractions obtenues par l'analyse mécanique (AM) sont comparées à celles déterminées par le FGMO. La différence FGMO-AM positive ou négative permet de raisonner l'état de dispersion obtenu avec FGMO (figure V.4).

Tous traitements confondus, on note globalement que :

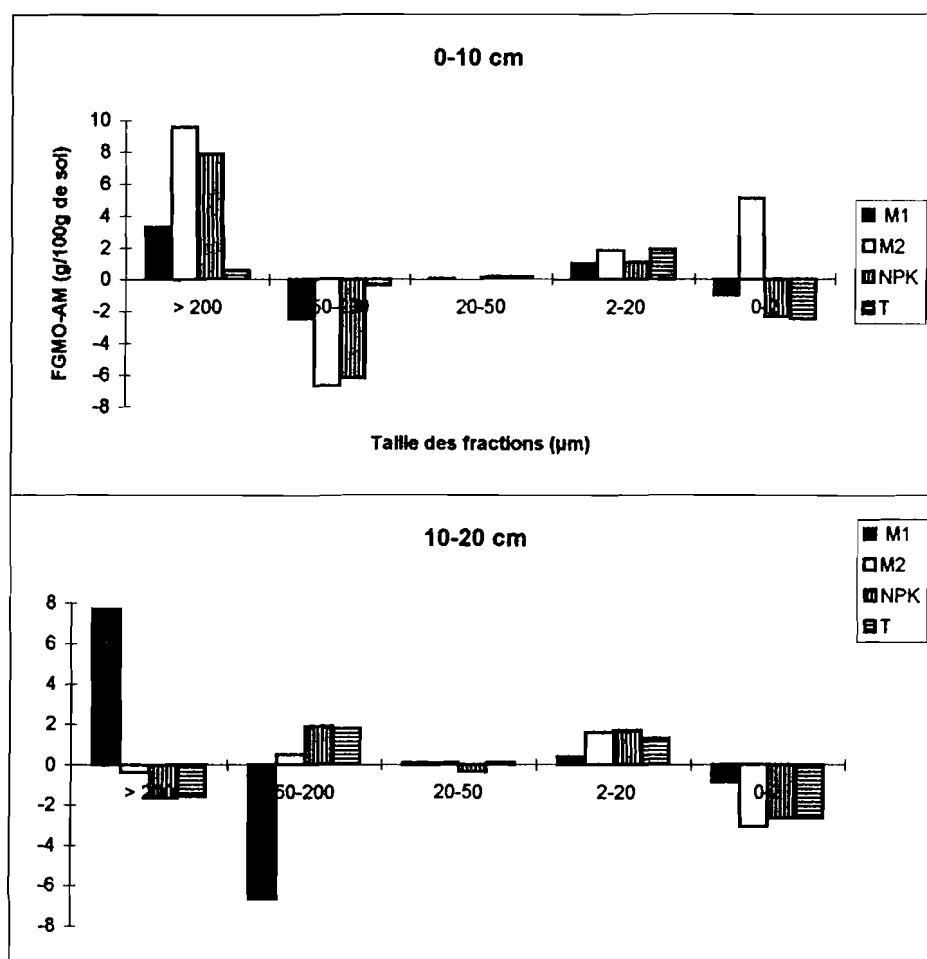
- avec FGMO on recueille plus de sables grossiers (SG) et moins de sables fins (SF) qu'avec AM, mais qu'il n'y a pratiquement pas de différences si l'on considère l'ensemble SG+SF.

On peut envisager deux explications à ces différences :

- l'analyse mécanique est menée sur 20 g de sol seulement au lieu de 40 g pour FGMO et la séparation des sables grossiers et sables fins pour ces sols sableux est plus efficace pour des quantités de sol faibles (cas du protocole AM) que fortes (cas du protocole FGMO),

- la deuxième explication peut concerner l'effet des ultrasons qui sont appliqués au sol total pour AM et aux seules fractions inférieures à 50 μ m pour FGMO. Dans le cas de AM, on a donc pu avoir (mais peu probable), une fragmentation des sables grossiers en sables fins.

Figure V.4 : Différence de masse des fractions issues du fractionnement granulométrique (FGMO) et de l'analyse mécanique (AM) selon les traitements.



On observe généralement peu de différences pour les limons grossiers (LG, 20-50 μm). Les différences (FGMO-AM) positives pour les limons fins (LF, 2-20 μm) sont plus ou moins compensées par des différences négatives pour les argiles (A, 0-2 μm). Ceci indique une dispersion incomplète des argiles au sein des éléments fins (0-20 μm).

La fraction 2-20 μm est donc constituée en partie, de micro-agrégats organo-limono-argileux. En conclusion, on peut considérer que la dispersion des échantillons a été efficace jusqu'à 20 μm , mais incomplète au sein des fractions limoneuses fines qui contiennent encore des argiles granulométriques. Ces observations rejoignent celles de BARTOLI et al. (1990) et FELLER et al. (1991a) sur la méthode utilisée ici (HMP/US).

2. 2. 3 - Caractéristiques des fractions

2. 2 .3. 1- Caractéristiques morphologiques

Les observations ont été faites à la loupe binoculaire uniquement sur les fractions 200-2000, 50-200 et 20-50 μm :

- les deux fractions 200-2000 et 50-200 sont composées de sables minéraux et de matière organique d'origine végétal : débris végétaux foliaires ou racinaires plus ou moins reconnaissables. On y trouve également des débris organiques plus ou moins humifiés de couleur très sombre,
- la fraction 20-50 μm , contient des limons grossiers minéraux et des éléments figurés organiques difficilement reconnaissables avec le matériel d'observation utilisé.

Selon FRANCOIS (1988) et FELLER et al. (1991a), la fraction 2-20 μm serait constituée de limons fins et d'une association de parois végétales ou fongiques et de micro-agrégats organo-limoneux, et la fraction 0-2 μm serait dominée surtout par des matières organiques amorphes et des débris microbiens associés aux minéraux argileux.

2. 2. 3. 2 - Caractéristiques chimiques générales des fractions

On présente ici globalement, pour l'horizon 0-10 cm et pour chacune des fractions, les teneurs en carbone exprimées en g C kg^{-1} de fraction, leur rapport C/N et leur contribution relative

Tableau V.3 : Fractionnement granulométrique de la matière organique; profondeur: 0-10 cm.
Année 1995

Traitements	Fractions (μm)	% pondéral	Carbone			Azote		C/N
			C kg^{-1} fract.	C kg^{-1} sol	%C total	g N kg^{-1} fract.	g N kg^{-1} sol	
M1	200-2000	73,0	4,05	2,96	24,7	0,09	0,06	46,7
	50-200	13,1	9,60	1,25	10,5	0,62	0,08	15,4
	20-50	1,56	31,2	0,49	4,10	1,67	0,03	18,7
	.2-20	4,48	72,2	3,24	27,1	5,84	0,26	12,4
	0-2	7,53	27,9	2,10	17,5	4,38	0,33	6,36
	W soluble		10,2	0,76	6,40	1,19	0,09	8,44
	somme	99,6	155,1	10,8	90,2	12,6	0,76	14,6
	sol non fract.	100,0		12,0			0,91	13,09
M2	200-2000	66,6	2,43	1,62	19,6	0,03	0,02	85,9
	50-200	11,2	5,47	0,61	7,40	0,39	0,04	14,1
	20-50	1,83	21,20	0,39	4,70	1,47	0,03	14,4
	.2-20	3,50	56,90	1,99	24,2	5,52	0,19	10,3
	0-2	18,0	16,20	2,92	35,4	2,14	0,39	7,57
	W soluble		6,00	1,08	13,1		0,09	12,0
	somme	101,1	102,20	8,61	104,5	9,55	0,76	
	sol non fract.	100,0		8,24			0,74	11,1
NPK	200-2000	72,3	1,99	1,44	17,3	0,05	0,03	42,0
	50-200	11,9	4,23	0,50	6,10	0,19	0,02	22,3
	20-50	1,97	20,00	0,39	4,70	1,01	0,02	19,9
	.2-20	3,61	60,40	2,18	26,3	4,86	0,18	12,4
	0-2	10,9	19,50	2,12	25,5	1,95	0,21	10,0
	W soluble		7,42	0,81	9,70		0,08	10,1
	somme	100,7	106,20	7,45	89,6	8,05	0,54	
	sol non fract.	100,0		8,31			0,67	12,4
T	200-2000	62,6	1,15	0,72	16,6			
	50-200	16,7	1,68	0,28	6,50	0,10	0,02	17,5
	20-50	1,58	8,17	0,13	3,00	0,72	0,01	11,3
	.2-20	2,52	32,3	0,81	18,8	2,35	0,06	13,8
	0-2	16,2	13,6	2,21	51,0	1,33	0,22	10,3
	W soluble		3,96	0,64	14,8		0,50	12,8
	somme	99,6	56,90	4,79	110,7	4,50	0,35	
	sol non fract.	100,0		4,33			0,38	11,4

Tableau V.4 : Fractionnement granulométrique de la matière organique; profondeur : 10-20 cm.
Année 1995

Traitements	Fractions (μm)	% pondéral	Carbone			Azote		C/N	
			C kg ⁻¹ fract.	C kg ⁻¹ sol	%C total	g N kg ⁻¹ fract.	g N kg ⁻¹ sol		
M1	200-2000	78,4	1,58	1,24	18,0	0,03	0,03	38,8	
	50-200	10,4	9,78	1,02	14,8	0,58	0,06	17,0	
	20-50	1,33	26,2	0,35	5,10	1,76	0,02	14,9	
	.2-20	2,72	64,5	1,76	25,6	5,85	0,16	11,0	
	0-2	6,55	26,9	1,76	25,7	2,81	0,18	9,60	
	W soluble				0,76	11,1		0,10	7,60
	somme	99,4	129,0	6,88	100,2	11,02	0,56	12,3	
sol non fract.	100,0			6,87		0,58	11,8		
M2	200-2000	54,9	1,41	0,77	13,2				
	50-200	14,7	3,35	0,49	8,40	0,17	0,03	19,9	
	20-50	1,63	11,2	0,18	3,10	0,84	0,01	13,4	
	.2-20	2,96	30,2	0,89	15,2	3,02	0,09	9,98	
	0-2	25,1	11,1	2,78	47,6	1,52	0,38	7,29	
	W soluble				0,90	15,4		0,06	15,0
	somme	99,3	57,2	6,03	103,0	5,55	0,56		
sol non fract.	100,0			5,85		0,55	11,0		
NPK	200-2000	61,8	1,98	1,22	20,5	0,08	0,05	24,8	
	50-200	19,6	2,57	0,50	8,50	0,15	0,03	17,0	
	20-50	1,88	10,8	0,20	3,40	0,59	0,01	18,3	
	.2-20	3,34	44,9	1,50	25,2	2,85	0,10	15,8	
	0-2	13,0	16,2	2,10	35,3	1,95	0,25	8,3	
	W soluble				0,73	12,3		0,05	14,6
	somme	99,6	76,4	6,26	105,3	5,62	0,49		
sol non fract.	100,0			5,95		0,50	12,0		
T	200-2000	60,5	0,82	0,50	12,8				
	50-200	15,0	1,24	0,19	4,80	0,07	0,01	18,8	
	20-50	1,39	5,15	0,07	1,90	0,28	0,00	18,2	
	.2-20	2,41	20,3	0,49	12,7	1,29	0,03	15,7	
	0-2	20,1	9,23	1,85	47,9	1,12	0,23	8,24	
	W soluble				0,64	16,5		0,05	12,8
	somme	99,4	36,7	3,74	96,6	2,76	0,32		
sol non fract.	100			3,87		0,35	11,2		

Tableau V.5 : Fractionnement granulométrique de la matière organique; profondeur : 20-40 cm.
Année 1995

Traitements	Fractions (μm)	% pondéral	Carbone		%C total	Azote		C/N	
			g C kg ⁻¹ fract.	g C kg ⁻¹ sol		g N kg ⁻¹ fract.	g N kg ⁻¹ sol		
M1	200-2000	57,8	1,55	0,89	14,3	0,04	0,02	36,8	
	50-200	13,1	2,94	0,38	6,20	0,15	0,02	19,7	
	20-50	1,78	9,69	0,17	2,80	0,51	0,01	19,2	
	.2-20	3,32	35,9	1,19	19,1	2,51	0,08	14,3	
	0-2	23,1	10,9	2,52	40,5	1,39	0,32	7,82	
	W soluble				0,81	13,0		0,06	13,5
	somme	99,0	61,0	5,97	95,9	4,60	0,52	11,5	
sol non fract.	100,0		6,23			0,53	11,7		
M2	200-2000	43,0	0,54	0,23	4,60				
	50-200	11,2	1,66	0,19	3,70	0,10	0,01	16,3	
	20-50	1,32	3,60	0,05	0,90	0,23	0,00	15,6	
	.2-20	3,29	15,5	0,51	10,0	1,20	0,04	12,9	
	0-2	40,8	7,27	2,96	58,2	0,81	0,33	9,02	
	W soluble			0,95	18,7		0,08	11,9	
	somme	99,6	28,6	4,89	96,0	2,34	0,46	10,6	
sol non fract.	100,0		5,09			0,47	10,8		
NPK	200-2000	48,1	0,60	0,29	6,40				
	50-200	14,3	0,54	0,08	1,70				
	20-50	1,56	5,82	0,09	2,00	0,34	0,01	17,0	
	.2-20	3,17	18,7	0,59	13,2	1,23	0,04	15,2	
	0-2	32,3	7,72	2,49	55,6	0,86	0,28	9,02	
	W soluble			0,71	15,8		0,07	10,1	
	somme	99,4	33,3	4,25	94,8	2,43	0,39	10,9	
sol non fract.	100,0		4,48			0,35	12,7		
T	200-2000	4,26							
	50-200	11,3	0,55	0,06	1,70				
	20-50	1,50	3,66	0,05	1,50	0,21	0,00	17,4	
	.2-20	3,15	10,3	0,33	8,90	0,65	0,02	15,9	
	0-2	39,9	5,89	2,35	64,3	0,63	0,25	9,42	
	W soluble			0,83	22,7		0,07	11,9	
	somme	100,1	20,4	3,62	99,2	1,49	0,34	10,6	
sol non fract.	100,0		3,65			0,32	11,4		

Figure V.5a,b et c : Etendues des teneurs en C (a) (g C kg^{-1} de fraction), des rapports C/N (b) et des distributions relatives du C (c) (%C total) pour chaque fraction de la couche 0-10 cm. Année 1995

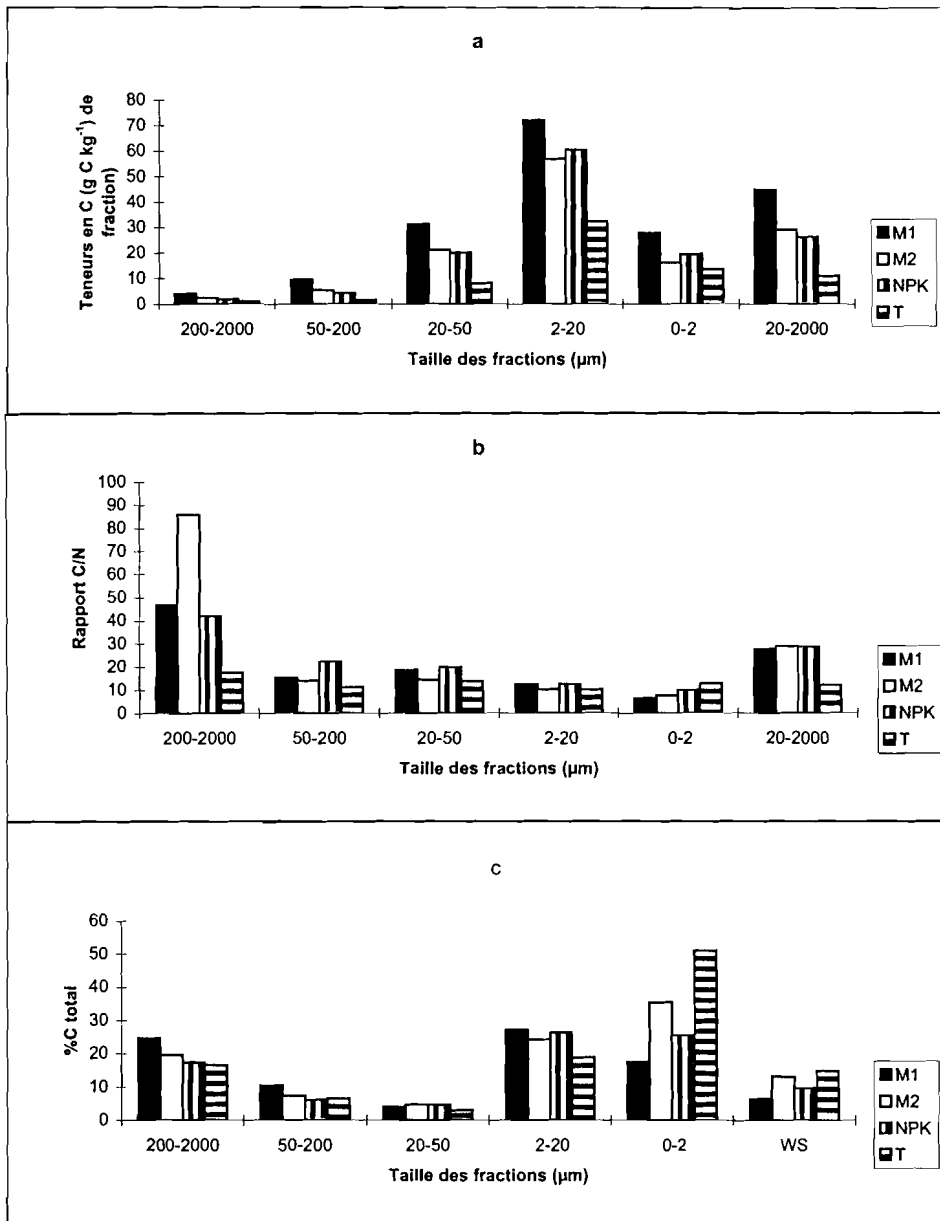
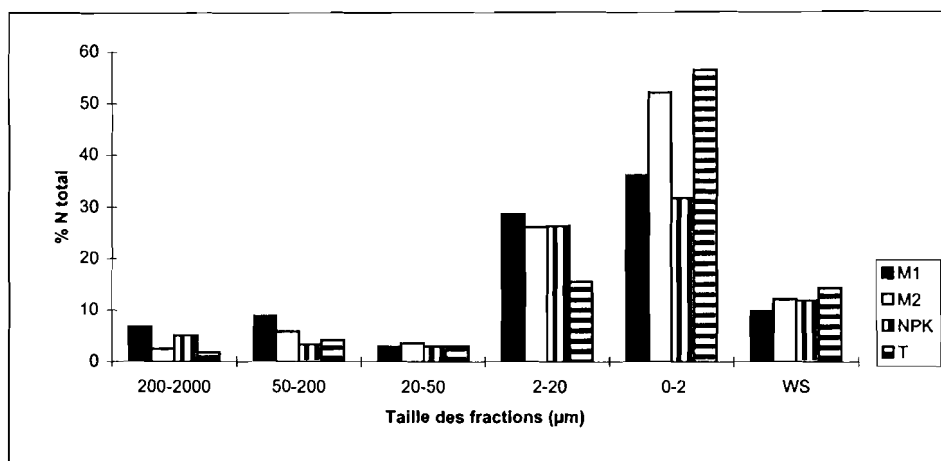


Figure V.5d : Distributions relatives de N pour chaque fraction de la couche 0-10 cm selon les traitements. Année 1995



(%) aux C et N totaux du sol. Les résultats détaillés sont dans les tableaux V.3 à V.5 et sont représentés schématiquement sur les figures V.5 a, b et c.

Tous traitements confondus, les teneurs en carbone varient de 0 à 72 g kg⁻¹ de fraction (Fig.V.4a). Elles sont faibles (4,0 - 9,6 g kg⁻¹ fraction de M1) dans les fractions 2000-200 et 200-50 µm, plus fortes (27,9 g kg⁻¹ fraction de M1) dans les fractions argileuses (0-2 µm) et élevées (31,2 à 72,2 g kg⁻¹ fraction de M1) dans les fractions limoneuses (20-50 et 2-20 µm). Les teneurs en C des fractions sont élevées en surface mais diminuent avec la profondeur. Les teneurs sont les plus élevées avec M1 et les plus faibles avec T. L'ordre de variation suivant les traitements est le suivant : M1 > M2 ≈ NPK > T.

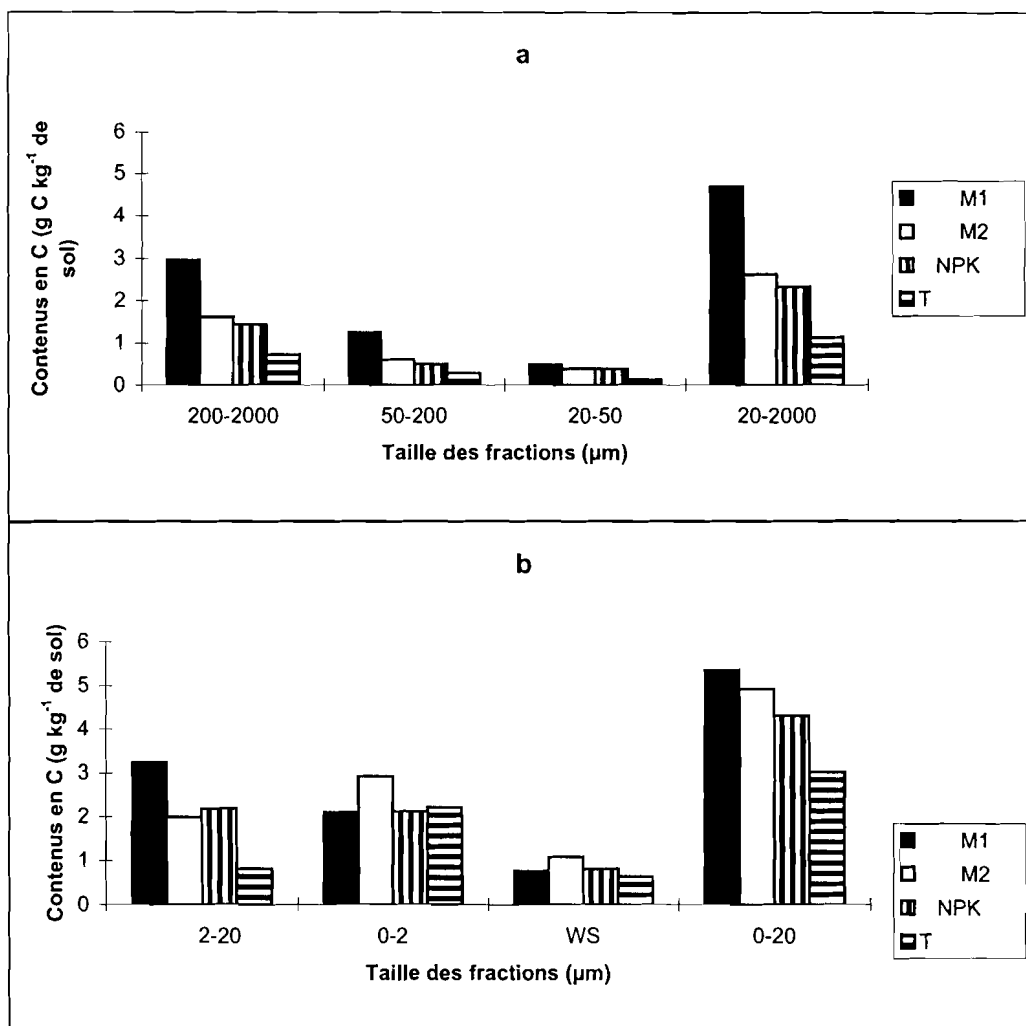
Les rapports C/N varient globalement de 6 à 86 et diminuent avec la taille des fractions. Toutefois, la fraction 20-50 présente parfois un rapport C/N plus élevé que la fraction 50-200µm. Les rapports C/N des fractions 200-2000 µm pour les traitements M1 et M2 impliquant des restitutions aériennes et racinaires de *Mucuna* avec des C/N relativement faibles (C/N de 18 à 22, cf. chapitre 3, § 2.3) apparaissent curieusement élevés (86 et 47).

La contribution relative de chaque fraction (%) au carbone total du sol est schématisé pour l'horizon 0-10 cm sur la figure V.5c. L'ensemble des fractions supérieures à 20 µm contient de 20 à 40 % du carbone total. En profondeur (20-40 cm), ces pourcentages sont plus faibles de 3 à 20 %. La fraction 2-20 µm participe pour 19 à 26 % du carbone total et la fraction 0-2 µm, 17 à 65 %. Pour la fraction hydrosoluble (W), elle contribue pour 6 à 22 % du carbone total. Cette valeur paraît élevée ici, car selon FELLER (1995), le carbone solubilisé au cours du fractionnement dans les sols sableux tropicaux représenterait environ 5 % du carbone total. L'explication possible à ces fortes valeurs de C soluble serait la forte acidité du sol et la présence de quantités importantes de composés acidosolubles (acides fulviques),

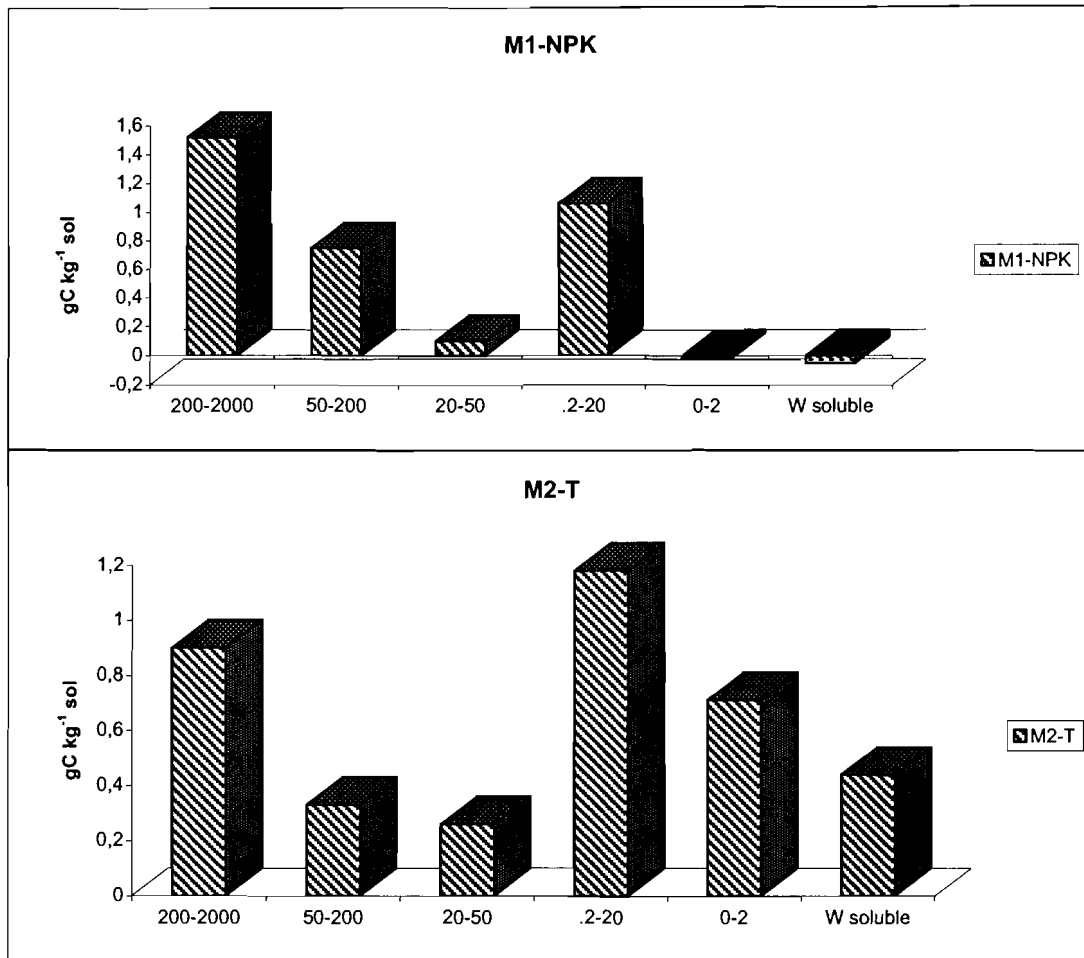
La contribution relative de chaque fraction (%) à l'azote total est schématisée sur la figure V.5 d.

On notera simplement que la fraction argileuse représente à elle seule systématiquement plus de 50 % de l'azote du sol. L'azote soluble est également élevé (9-21 %). Par contre, les fractions sableuses représentent moins de 10 % de l'azote total.

Figure V.6a et b : Variation des contenus en C (g C kg^{-1} sol) des fractions selon les traitements pour la couche 0-10 cm. Année 1995



**Figure V.7 : Différences des contenus en C des fractions entre M1 et NPK et M2 et T.
Couche 0-10 cm.
Année 1995**



2.2.3.3 - Contenus en carbone des différentes fractions selon les traitements

Les contenus en C (g kg^{-1} de sol) des fractions sont schématisés sur la figure V.6 a et b pour l'horizon 0-10 cm. Ces contenus décroissent des fractions 200-2000 μm aux fractions 20-50 μm (Fig.V.6a), puis, sont plus élevés par les fractions 2-20 et 0-2 μm (Fig.V.6b). Les contenus en C de la fraction soluble WS est de l'ordre de 1g C kg^{-1} sol. Pour les fractions 200-2000, 50-200, 20-50 et 2-20 μm , on note le même sens de variation pour les contenus en C, avec $M1 > M2 \cong \text{NPK} > T$, alors que les variations sont plus faibles pour 0-2 μm et WS.

Concernant les sols cultivés tropicaux, il a été démontré (FELLER, 1995) que les différences de teneur en argile ont un effet important sur les contenus en C des fractions inférieures à 20 μm , mais faible sur celui des fractions supérieures à 20 μm . Aussi, pour les fractions 0-2 et 2-20 μm , on ne peut comparer que les traitements dont les sols ont une texture identique, soit M1 avec NPK et M2 avec T.

La FigureV.7 représente les différences de contenus en C de l'horizon 0-10 cm entre M1 et NPK puis M2 et T.

Pour ces deux comparaisons, une part importante des variations observées est due aux fractions supérieures à 50 μm et à la fraction 2-20 μm .

Pour le traitement M1, on ne note pas d'effet du Mucuna sur la fraction 0-2 μm (M1-NPK), alors qu'un effet de cette légumineuse semble apparaitre sur cette fraction avec le traitement M2 (M2-T). Mais cette différence positive peut ne pas être due à un effet de l'apport de C dans la fraction 0-2 μm sous M2, mais tout simplement à une perte de C par érosion sous le traitement T, érosion qui a bien été observée durant toute la durée des essais (perte en terre moyenne de $50\text{ t ha}^{-1}\text{ an}^{-1}$).

En résumé, nous concluons que l'effet du Mucuna sur l'augmentation des contenus en C du sol se manifeste par une augmentation des contenus des fractions supérieures à 50 μm et de la fraction 2-20 μm , avec peu de variation sur les fractions 20-50 μm , 0-2 μm et WS.

3. DISCUSSION

3.1- Effets des traitements sur les variations interannuelles des teneurs en C et N totaux des sols

Les variations des teneurs en azote suivent celles en carbone. Aussi nous ne discuterons que de ces dernières dans ce paragraphe.

De façon générale, on constate que, à l'exception du témoin dont les teneurs en C diminuent régulièrement avec le temps, tous les autres traitements conduisent à des augmentations sensibles des teneurs en carbone dans les horizons de surface et en particulier dans la couche 0-10 cm. Les valeurs les plus élevées sont observées pour M1, environ trois fois celles des teneurs initiales. Les deux traitements M2 et NPK conduisent à des augmentations d'environ une fois et demi les teneurs initiales, alors que les niveaux et qualités des restitutions sont bien différentes : provenant uniquement du maïs pour NPK, du maïs et de *Mucuna* (une année sur deux) pour M2. Les rendements en maïs étant peu différents pour les deux traitements, ceci laisserait supposer que seules les restitutions par le maïs sont importantes pour augmenter les teneurs en C du sol dans le traitement M2. Autrement dit la décomposition de la litière et du système racinaire du *Mucuna* serait rapide avec un temps de renouvellement inférieur à deux ans. Concernant la litière foliaire de *Mucuna*, les observations de terrain confirment effectivement sa disparition de la surface du sol en 15 à 20 mois après le semis. Par ailleurs, à l'appui de cette hypothèse, on peut aussi noter que les débris végétaux de taille supérieure à 200 μm de la couche 0-10 cm du sol ont pour tous les traitements, à l'exception du témoin, des rapports C/N très élevés (de 41 à 86) plus proches de ceux des restitutions par le maïs (C/N variant de 72 à 118) que des restitutions par le *Mucuna* (C/N de 18 à 22). On notera toutefois que le C/N des fractions 200-2000 μm pour le traitement M1 est plus faible (46,7) que pour M2 (85,9).

D'un autre côté, on pourrait aussi faire l'hypothèse que, au cours de la décomposition de *Mucuna*, ce sont les constituants solubles et les contenus cellulaires riches en azote et à rapports C/N faibles qui sont préférentiellement minéralisés, laissant dans le sol les constituants ligno-cellulosiques à rapports C/N élevés. Nous n'avons toutefois pas de données sur les rapports C/N de ces différents constituants végétaux du *Mucuna*. En effet, le stockage de C

par les apports de *Mucuna* ne peut être négligé dès lors que le *Mucuna* est appliqué, comme il ressort de la forte accumulation observée pour le traitement M1.

Enfin, un troisième facteur qui doit être considéré ici, est le problème des adventices. Des observations récentes de terrain (BARTHES et al., 1999) ont montré que la parcelle NPK est fortement envahie par les adventices (graminées surtout et quelques légumineuses) dans l'interculture de maïs, cet envahissement est beaucoup plus faible en présence de *Mucuna*. Les adventices constituent probablement une source non négligeable d'apports organiques au sol, et pourraient participer des augmentations observées sous le traitement NPK. Nous manquons toutefois de données quantifiées à ce sujet. Seule l'utilisation de traceurs en abondance naturelle (^{13}C) ou artificielle (^{14}C) pourrait nous permettre de répondre à ces interrogations. Une étude, mettant en oeuvre l'isotope ^{13}C , est en cours à ce sujet.

Enfin, en rapprochant les variations interannuelles des rendements (Chapitre 3, Figure III.1a et b) avec celles des teneurs en carbone du sol (Chapitre 5, Figure V.2), on peut constater que, pour ce dispositif, la teneur en C apparaît comme un bon indicateur de la fertilité même si ce n'est évidemment pas le seul facteur explicatif (Chapitre IV, § 4). Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par WERTS (1979) au sud-Bénin et TRIOMPHE (1996) au nord Honduras. Les diminutions continues des teneurs en C du sol du traitement T entre 1988 et 1996 peuvent être attribuées à la fois à des processus de minéralisation et à des processus d'érosion. Concernant ce dernier point, nous avons montré par ailleurs (AZONTONDE, 1993) que l'érosion est en effet très forte pour T ($50\text{-}55 \text{ t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$), mais beaucoup plus réduite ($< 2 \text{ t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$), pour les traitements M1, M2 et NPK. Ceci est bien en accord avec de nombreux résultats de la littérature sur l'effet protecteur des mulch et couvertures vivantes contre l'érosion en milieu tropical semi-aride à humide (ROOSE, 1981 ; LAL et al., 1978 ; LAL, 1996).

3.2- Quels sont les compartiments organiques impliqués dans les variations du carbone total observées?

Pour répondre à cette question, nous avons mis en oeuvre un fractionnement granulométrique de la MO du sol.

Sur la base de la morphologie et du rapport C/N des fractions séparées et de divers travaux antérieurs sur des sols tropicaux (CERRI et al., 1985 ; FRANCOIS, 1988 ; FELLER et al.,

1991a,b ; DJEGUI, 1992), FELLER (1993, 1995) et FELLER et BEARE (1997) ont distingué quatre types de fractions différentes :

- des fractions organiques de taille $> 20 \mu\text{m}$ constituées de « débris végétaux » à différents stades de décomposition,
- une fraction de taille $2-20 \mu\text{m}$ considérée comme un complexe organo-limono-argileux, associant des débris végétaux et fongiques très humifiés et des microagrégats organo-limono-argileux très sableux ayant résisté au processus de désagrégation et dispersion lors du fractionnement,
- une fraction organo-argileuse de taille $0-2 \mu\text{m}$ où la MO, dominée par des constituants amorphes, est intimement associée à la matrice minérale,
- une fraction de MO soluble (eaux de fractionnement), représentant rarement plus de 5 % de la MO totale de l'échantillon.

Les rapports C/N diminuent généralement des fractions granulométriques grossières ($C/N > 20$) aux fractions fines ($C/N < 10$).

Nos propres observations et données (§ 3.2.3.2) confirment bien ce schéma général avec des rapports C/N (Fig V.4 b) généralement supérieurs à 40 pour la fraction $200-2000 \mu\text{m}$ (et > 27 pour la fraction globale $20-2000 \mu\text{m}$), et variant entre 10,3 et 12,4 pour $2-20 \mu\text{m}$ puis entre 6,4 et 10,2 pour $0-2 \mu\text{m}$. Toutefois ici, la fraction soluble peut représenter jusqu'à 22 % du carbone total, ce qui est considérable, et que nous pouvons éventuellement expliquer par des pH acides. Le pH varie en effet de 5,1 à 5,6 en début d'essais et entre 3,9 et 5,2 en fin d'essais, tous traitements confondus.

Par ailleurs, de l'analyse des contenus en carbone (g C kg^{-1} de sol) des différentes fractions pour les différents traitements (§ 3.2.3.2), il ressort que les augmentations des teneurs en C total observées sous *Mucuna* M1 ou M2 sont dues prioritairement aux fractions $200-2000$ et $2-20 \mu\text{m}$ et secondairement aux fractions $50-200$ et $0-2 \mu\text{m}$.

Concernant les fractions de taille supérieures à $50 \mu\text{m}$, dans les sols à texture grossière des régions tropicales, lors des processus d'agradation des teneurs en C, l'augmentation observée par différents auteurs est en effet, souvent le fait des fractions sableuses (FELLER, 1995 ; FELLER et BEARE, 1997).

Bien que ces fractions aient un temps de renouvellement rapide (TROUVE et al., 1991 ; FELLER et al., 1991c et DESJARDINS et al., 1994), ces fractions sont les sites d'entrée de l'essentiel des restitutions organiques au sol (feuilles, racines, etc.).

Par contre, les augmentations citées sur la fraction limoneuse 2-20 μm sont rarement aussi importantes que celles observées ici. Il faut dire que peu de résultats de la littérature concernent encore les effets des mulchs et/ou des plantes de couverture. A ce sujet, FELLER et al. (1987), pour des sols sableux du Sénégal, ont mis en évidence un stockage préférentiel de la MO dans les fractions grossières $> 50 \mu\text{m}$ pour des enfouissements de pailles compostées alors qu'avec les matériaux identiques mais appliqués en mulch, l'enrichissement concernait la fraction organo-minérale 0-50 μm . On peut donc s'interroger si la forte augmentation observée ici pour cette fraction, est spécifique ou non de ce mode de gestion. Ce stockage préférentiel pourrait avoir deux causes :

- l'existence d'un pool non négligeable de MO soluble, comme c'est le cas ici, et qui s'adsorberait préférentiellement sur les MO relativement stables des fractions limoneuses. Ceci a été montré avec la molécule modèle d'Atrazine (FELLER, 1999).
- la modification de l'activité de la mésofaune qui pourrait conduire au développement de microagrégats de la taille des limons protégeant la MO contre la minéralisation.

Pour confirmer ou non ces hypothèses, d'autres travaux sont nécessaires. Mais, dans tous les cas, les augmentations relativement faibles des teneurs en C dans la fraction argileuse des sols sableux ont été plusieurs fois observées (FELLER et BEARE 1997) dès lors que l'une des situations de la comparaison n'est pas sujette à des processus d'érosion en nappe. Ceci est bien illustré ici. Dans le cas de la comparaison de M1 avec NPK où les processus d'érosion sous M1 et NPK, sont faibles, on n'observe aucune différence des teneurs en C pour la fraction 0-2 μm . Par contre, dans la comparaison M2-T, où T est sujet à des pertes de MO par érosion, on observe de plus faibles contenus en C dans la fraction 0-2 μm pour T que pour M2. Cette différence est probablement due plutôt à une perte pour T par érosion qu'à un gain dans cette fraction pour M2.

4. CONCLUSION

Les sols ferrallitiques du sud-Bénin (terres de barre), ont été soumis à différents traitements (M1, M2, NPK et T). Nous avons vu dans les chapitres précédents que le système *Mucuna*-maïs est, en terme de productivité végétale, une alternative particulièrement intéressante pour la gestion des terres dans le sud Bénin, non seulement par rapport aux systèmes traditionnels (traitement T), mais aussi par rapport aux systèmes plus intensifiés avec fertilisation chimique

(traitement NPK), AZONTONDE et al. (1998). Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux effets sur le stock et les formes de MO du sol.

Globalement, les taux et stocks de carbone diminuent de la surface vers la profondeur du sol. Et si l'on se réfère aux modes de gestion des sols, les sens de variation des teneurs ou stocks en carbone organique est le suivant : $M1 > M2 = NPK > T$. Il existe une relation statistique ($r = 0,98$), mais non nécessairement causale, entre les teneurs en carbone total et les rendements en maïs. La teneur en C de la couche 0-10 cm peut donc servir, pour ces systèmes, d'indicateur de fertilité.

Pour préciser l'effet du *Mucuna* sur le stockage du carbone, une étude spécifique de la matière organique a été faite à partir d'un fractionnement granulométrique du sol. Cette méthode a conduit aux résultats suivants :

- les bilans en masse, carbone et azote sont acceptables, ainsi que l'état de désagrégation et de dispersion obtenus même si une dispersion incomplète de la fraction 0-20 μm est observée,
- les rapports C/N des fractions baissent des fractions grossières (38-86) aux fractions fines (6-10) comme souvent observé en milieux tropicaux. Toutefois, on constate que les fractions grossières sous *Mucuna* ont des rapports C/N élevés (46-86), alors que les restitutions par *Mucuna* (feuilles et racines) présentent des rapports C/N faibles (18-22). Ceci amène à s'interroger sur l'origine de la MO stockée : *Mucuna*, maïs ou adventices ? Diverses hypothèses ont été envisagées mais des études complémentaires sont nécessaires,
- le carbone et l'azote hydrosolubles représentent 6 à 20 % du carbone et de l'azote totaux du sol ; ces valeurs, assez élevées pour les sols ferrallitiques, peuvent éventuellement s'expliquer par des pH acides (3,9-5,2 en fin d'essai),
- les compartiments responsables des variations du stock organique en relation avec le mode de gestion des parcelles, sont prioritairement les fractions supérieures à 50 μm , et dans une moindre mesure, la fraction 2-20 μm . Ce dernier aspect apparaît comme une « nouveauté » car généralement les variations des teneurs en C sur cette fraction sont relativement faibles. Ceci résulte peut-être d'un effet spécifique des modes de gestion avec mulch et/ou plantes de couverture.

Dans le chapitre suivant, nous tentons de voir comment ces variations quantitatives et qualitatives de la MO s'accompagnent de variations de l'azote minéral *in situ* et du potentiel de minéralisation de C et N.

CHAPITRE VI

EFFETS DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS SUR LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE

Ce chapitre comporte deux volets :

- 1- la dynamique de l'azote minéral et l'évaluation de l'azote potentiellement minéralisable
- 2- le bilan de l'azote sous les différents modes de gestion du sol.

1. DYNAMIQUE DE L'AZOTE MINERAL ET EVALUATION DE L'AZOTE POTENTIELLEMENT MINERALISABLE

1.1- Introduction

Les "terres de barre" sont des sols sableux à sablo-argileux ou argilo-sableux où l'argile dominante est la kaolinite à faible capacité d'échange cationique (5 à 10 cmole kg⁻¹ de sol). Cette fraction argileuse est en très faible teneur (3 à 15 %) dans les horizons de surface qui constituent la zone de prédilection des racines de la plupart des cultures pratiquées sur ces sols. Aussi, la matière organique joue-t-elle un rôle de premier ordre dans leur fertilité (WERTS, 1979 et AZONTONDE, 1993). De nombreux auteurs dont récemment WANEUKEM et GANRY (1992), DJEGUI (1992) et BACYE (1993) ont montré que la fourniture d'azote à la céréale est tributaire de l'entretien organique du sol.

GANRY (1990) montre que dans le cas des sols sableux de l'Afrique et d'une céréale, il faut assurer l'entretien organique du sol par du compost (ou du fumier) et maximiser la source d'azote exogène par une légumineuse en rotation avec la céréale. Le chapitre précédent (chapitre 5) nous a montré que les compartiments responsables des variations du stock organique en relation avec le mode de gestion des sols, sont prioritairement, les fractions supérieures à 50 μm et dans une moindre mesure, la fraction 2-20 μm .

La baisse des taux de MOS se traduit par une diminution également importante des taux de N.

Le présent chapitre étudie comment ces variations quantitatives et qualitatives de la MOS s'accompagnent de variations de N minéral in situ et du potentiel de minéralisation de N.

1.2. Aperçu bibliographique

L'azote potentiellement minéralisable ou azote disponible (N_d) a été pour la première fois défini par STANFORD et SMITH (1972) comme la quantité d'azote organique susceptible d'être minéralisée à long terme.

Pour certains auteurs (CHENEBY et al., 1994), l'azote potentiellement minéralisable (N_p) est le compartiment "labile" de l'azote organique qu'on oppose à l'azote stable qui se minéralise très peu. Le N "franchement labile" serait constitué par des acides aminés libres.

Les Cinétiques de STANFORD et SMITH s'écrivent comme suit :

$$dN/dt = -k \cdot N$$

le temps t est exprimé en semaines et N par exemple en $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$

k est la constante de vitesse exprimée en temps

Si l'on intègre l'expression de $t = 0$ à $t = t$, il vient :

$$[dN/N] = [-k \cdot dt]$$

$$\text{Ln}(N) - \text{Ln}(N_d) = -k (t-0)$$

$$N = N_d \cdot \text{EXP}(-kt)$$

Si on utilise un développement en série, on peut écrire :

$$N = N_d \cdot (1 - k \cdot t + k^2 t^2 - \dots)$$

Pour t petit, il reste :

$$N = N_d(1 - k \cdot t) \text{ et } dN/dt = k \cdot N_d$$

$k \cdot Nd$ est donc la quantité minéralisable par unité de temps, pour t très petit, c'est-à-dire au départ. k et Nd sont liés statistiquement, quand l'un augmente, l'autre diminue.

Quant à l'azote minéralisé (N_m), d'autres auteurs (CAMERON et POSNER, 1979 ; LADD et al., 1985 ; DALAL et MAYER, 1987) supposent qu'il est subdivisé en plusieurs sous-compartiments "pool" dont les vitesses de minéralisation sont différentes.

L'origine de Nd est donc multiple :

- la biomasse microbienne
- la MO humifiée
- les résidus culturaux plus ou moins anciens.

L'azote organique du sol est transformé par les microorganismes en NH_4^+ (ammonification). Avec une bonne aération, NH_4^+ s'oxyde rapidement en NO_2^- puis en NO_3^- sous l'action de microorganismes principalement autotrophes (nitrosation et nitratisation). Ainsi, le taux d'accumulation de NO_3^- reflète en général le taux de la minéralisation à condition que tous les maillons de la chaîne fonctionnent également dans les conditions environnementales requises.

Le taux de minéralisation dépend de trois facteurs :

- la nature de la matière organique du sol (MOS) : les rapports C/N élevés provoquent l'immobilisation de N minéral ;
- la température : selon STANFORD et SMITH (1972), entre 5 et 40°C, la minéralisation est proportionnelle à la température d'incubation. Au-delà de 40°C, la nitrification se ralentit à cause de la volatilisation de NH_3 .
- l'humidité : la minéralisation maximum a lieu pour une gamme d'humidité de 0,1 à 0,3 bar (STANFORD et EPSTEIN, 1974). Au delà de cette tension, la minéralisation diminue avec l'augmentation de la sécheresse. DOMMARGUES (1970), ajoute que l'ammonification reste encore très active aux faibles humidités 60 bars (pF : 4,8). La nitrification par contre est plus exigeante, bien qu'elle persiste jusqu'au pF 4,7 dans certains sols tels que les sols vertisoliques de l'Afrique de l'ouest ; mais son intensité est fortement diminuée (DOMMARGUES, 1962), ce qui peut engendrer une accumulation de l'azote ammoniacal (DOMMARGUES et MANGENOT (1970).

Les valeurs de N minéralisable mesurées sont considérablement influencées par le prétraitement de l'échantillon de sol incubé : séchage à l'air ou à l'étuve, conservation du sol à l'état sec ou humide, conservation à la température du laboratoire ou en chambre froide.

Selon MARY et REMY (1979), le séchage à l'air de l'échantillon de sol entraîne une extraminéralisation au cours des premières semaines de l'incubation après réhumectation. Ce surcroît a été évalué à 52% et 41% de N minéralisable après 7 et 14 jours respectivement.

Ces mêmes auteurs considèrent, dans les cinétiques de minéralisation de N au cours des incubations au laboratoire, deux phases :

- une phase correspondant à un régime transitoire qui dure environ 2 semaines et qui est due à la réaction du sol qui, réhumecté brutalement après séchage, tamisage et stockage de plus ou moins longue durée, entraîne une minéralisation des résidus organiques très labiles et particulièrement de la biomasse microbienne,
- une phase où s'établit un régime permanent au cours duquel la minéralisation de la MOS humifiée prédomine.

Ces différents aspects ont amené certains auteurs à proposer :

- l'utilisation d'échantillons non séchés : la minéralisation de N organique est, dans ce cas, généralement linéaire en fonction du temps (ADDISCOTT, 1983 ; TABATABAL et AL-KHAFADJI, 1989),
- l'élimination de l'extraminéralisation correspondant à la première phase de minéralisation dans l'estimation de Nd (VONG et al., 1989),
- l'utilisation de modèles à double compartiment (MOLINA et al., 1980 ; DEANS et al., 1986).

Dans les conditions climatiques du Sud-Bénin, l'existence de deux saisons sèches alternées avec deux saisons de pluies impose tout naturellement ces situations de séchage et de réhumectation brutale du sol.

1.3. Matériel et méthodes

Il s'appuie sur le dispositif expérimental présenté dans les chapitres I et II du présent document. Il convient cependant de le compléter par le mode de prélèvement des échantillons destinés aux dosages de N minéral au champ et de potentiellement minéralisable (Nd) au laboratoire.

1.3.1. Prélèvement d'échantillons de sol.

Le plan de prélèvement des échantillons est schématisé par la figure IV.1. Chaque parcelle a été subdivisée en 60 mini-parcelles de 3 m sur 1,33 m.

Les échantillons sont prélevés en août, après la récolte de maïs, sur deux profondeurs (0-10 et 10-20 cm), pour Nd, puis, de mars à septembre sur trois profondeurs (0-10, 10-20 et 20-40 cm), pour N minéral au champ.

Le mode de prélèvement pour le dosage de l'azote total est explicité dans le chapitre V.

Pour les dosages de N minéral et de Nd, les prélèvements sont effectués à la tarière dans toutes les mini-parcelles pour la constitution par profondeur d'un composite pour chaque parcelle ; ces échantillons sont ensuite séchés à l'air, broyés puis tamisés à 2 mm avant d'être ensachés et amenés au laboratoire. Pour la détermination de la densité apparente (d_a) et de l'humidité du sol, 17 prélèvements répartis au hasard sont réalisés dans chaque parcelle avec des anneaux pF, de mars à septembre.

1.3.2. Méthodes analytiques

On distingue N minéral mesuré au champ et de Nd mesuré en laboratoire.

Pour chacun de ces deux types de N, les deux formes d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+), sont déterminées.

- Azote minéral

L'extraction est faite sur l'échantillon non séché, avec une solution de KCl 1M juste après le prélèvement. Les formes ammoniacales (NH_4^+) et nitriques (NO_3^-) sont dosées par colorimétrie au spectrophotomètre du laboratoire d'analyse du Centre National d'Agropédologie (CENAP). L'ammonium est dosé après complexation avec le réactif de Nessler. Les nitrates sont réduits en présence d'un mélange d'acide sulfurique concentré et d'acide salicylique, en nitrites dosés par réaction colorée.

- Azote minéralisable en laboratoire (Nd)

Pour la détermination de Nd en laboratoire, les échantillons de sol sont tamisés à 2 mm puis broyés plus finement. On applique la méthode d'incubation-percolation décrite par STANFORD et SMITH (1972).

Cette une méthode de longue durée, qui permet de disposer d'un nombre suffisant de points expérimentaux nécessaires au calcul par extrapolation de Nd ; il s'agit d'une incubation aérobie

où la température et l'humidité sont constantes et au cours de laquelle le sol est lessivé périodiquement avec une solution de CaCl_2 M/100 puis par une solution de recharge cationique. Les déterminations sont faites au laboratoire d'analyse du CIRAD de Montpellier. La durée totale de l'incubation est de 19 semaines.

Les formes minérales (N-NH_4^+ et N-NO_3^-) sont dosées au colorimètre à flux continu (auto-analyseur). Après dialyse, les nitrates sont réduits en nitrites par le sulfate d'hydrazine pour former un composé "diazo".

L'azote ammoniacal est dosé par la réaction de BERTHELOT au bleu d'indophénol.

Les résultats obtenus pour trois répétitions par cette technique sont reproductibles .

1.3.3- Méthode d'ajustement

Pour l'ajustement a été utilisé le module de "regression non linéaire" du logiciel STAT-ITCF (1989).

Les quantités d'azote (N_m) mesurées à chaque percolation sont cumulées et les valeurs sont ajustées suivant une cinétique de premier ordre :

$$N_m = N_d (1 - e^{-kt})$$

N_m = quantité de N organique minéralisé à l'instant t (mg N kg^{-1} de sol) dans le sol incubé.

N_d = azote potentiellement minéralisable (mg N kg^{-1} de sol). Il correspond à l'azote minéralisé à t infini, c'est-à-dire à la taille du compartiment minéralisable si on laissait minéraliser à l'infini.

k = constante de vitesse de minéralisation (semaine^{-1}) de N organique

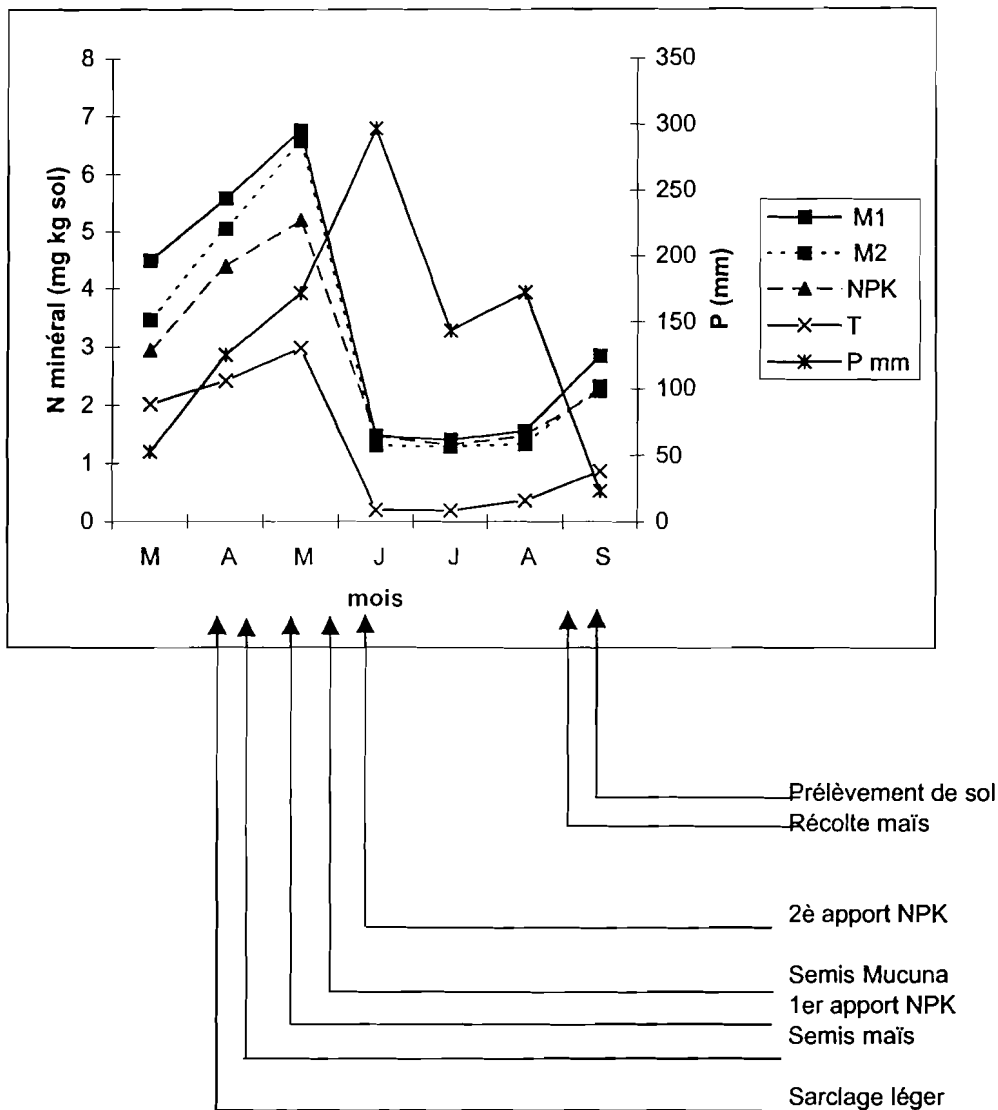
t = temps d'incubation exprimé en semaines.

1.4 - RESULTATS

1.4.1. Dynamique saisonnière de l'azote minéral au champ.

La variation des teneurs et stocks de N dans les sols est suivie dans les trois horizons (0-10, 10-20 et 20-40 cm) du sol durant toute la saison culturale qui couvre la période de mars à septembre (fig. VI.1 et VI.2).

Figure VI.1 : Variation de l'azote minéral (mg kg^{-1} sol) dans la couche 0-10 cm et de la pluviométrie (mm) au cours de l'année 1995.
 (Le détail des variations de N minéral figure dans l'annexe VI.1)



L'analyse de ces graphiques fait apparaître que, quel que soit le traitement, la dynamique de N minéral est plus sensible en surface qu'en profondeur et l'amplitude de sa variation change suivant les traitements.

Les taux de N ammoniacal ($0,2-5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ sol}$) restent toujours plus élevés que ceux de l'azote nitrique ($0,1-2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ sol}$).

Globalement, l'évolution des taux de N minéral n'est pas modifiée par les traitements ; elle varie dans le même sens que l'humidité du sol dépendante de la pluviométrie.

Le suivi de la variation saisonnière de N minéral au champ fait ressortir 4 phases dans l'évolution de ces teneurs : on observe au cours de l'année un accroissement rapide qui aboutit en mai à un pic (première phase) des teneurs de N minéral 45 à 60 jours après le démarrage des puies correspondant à 15 ou 30 jours après le sarclage léger et le semis. Ce pic est suivi d'un déclin rapide entre mai et juin, des taux (deuxième phase) qui dure 20 à 30 jours. Il correspond à la période la plus pluvieuse de l'année et à la floraison du maïs. Dans son déclin, N minéral atteint sa valeur minimum (variable suivant les profondeurs et les traitements) en juin à 0-10 cm, en juillet à 10-20 cm et en août à 20-40 cm, puis reste constant (troisième phase) pendant 30 à 60 jours (période de petite saison sèche) avant d'aborder en août une légère augmentation (quatrième phase) après la récolte et les premières pluies de la petite saison des pluies.

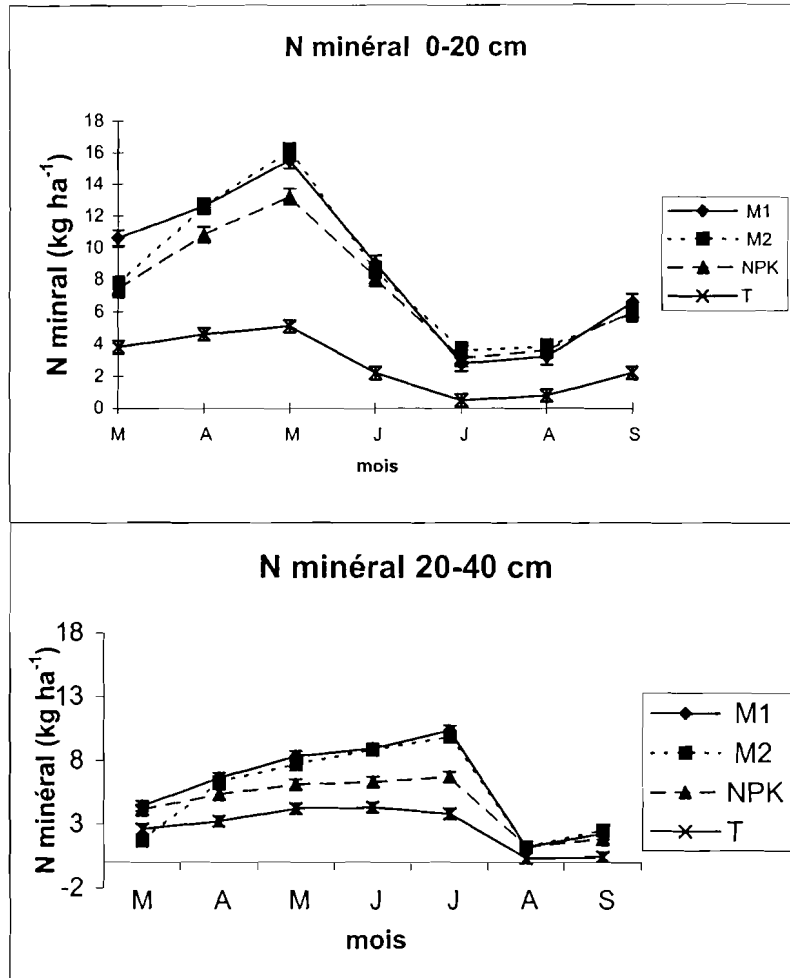
Cette dynamique saisonnière du pic (valeur maximum) de N minéral coïncide avec les déplacements (juin à juillet) des maxima d'humidité constatés dans les horizons 0-10, 10-20 et 20-40 cm (Annexe VI.1d).

Si l'on se rapporte à la figure VI.2 inspirée de la représentation schématique de BLONDEL (1971), on constate un décalage net entre le pic d'azote minéral de la couche 0-20 cm et celui de la couche plus profonde 20-40 cm. Par ailleurs, les stocks d'azote minéral sont moins élevés qu'en surface.

1.4.2. Azote potentiellement minéralisable (Nd)

Les valeurs cumulées de N minéral, par traitement et pour les profondeurs 0-10 et 10-20 cm sont consignées dans l'annexe VI.2 et schématisés dans l'annexe VI.3 a et b, tandis que les valeurs estimées de Nd et les coefficients de détermination R^2 obtenus sur la base des données

Figure VI.2 : Variation saisonnière des stocks (kg ha^{-1}) d'azote minéral dans les couches 0-20 et 20-40 cm
 Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (S_x)



cumulées de chaque répétition dans l'application du module de "Régression non linéaire" du logiciel STAT-ITCF sont présentées dans les tableaux VI.1 et VI.2.

L'analyse de ces résultats fait ressortir ce qui suit :

- 1- les valeurs cumulées de N minéral varient suivant les traitements ;
- 2- le N ammoniacal reste toujours plus élevé que le N nitrique, à l'exception de M2, dans le N minéral au champ recueilli dans les échantillons sans incubation (t_0) ;
- 3- le N nitrique devient progressivement plus élevé (2 fois la première semaine et 10 à 12 fois à la fin de l'incubation) que le N ammoniacal, de la première à la dix neuvième semaine d'incubation ;
- 4- les valeurs de Nd varient suivant les traitements. Elles sont faibles ($Nd = 10,50 \text{ mg kg}^{-1}$ sol dans la couche 0-10 cm pour le témoin T et plus élevées avec des valeurs assez proches (41, 42 et 43 mg kg^{-1} sol pour les traitements M2, M1 et NPK respectivement. L'ordre de variation selon les traitements est le suivant :

$$NPK \geq M1 \geq M2 > T$$

De 10 à 20 cm de profondeur, les valeurs Nd de NPK, M2 et M1 sont plus faibles que celles de la surface et l'ordre de variation devient : $M1 > NPK \geq M2 > T$. En revanche, l'ordre de variation de la production moyenne hebdomadaire de N minéral ($K \times Nd$), est le même, aussi bien en surface qu'en profondeur ($M1 > NPK > M2 > T$).

- 5- les valeurs du flush de minéralisation (N_{flush}) qui représente le surplus de N minéralisé au cours de la première semaine par rapport à la deuxième semaine d'incubation figurent dans l'annexe VI.2. Elles sont élevées ($4,17 \text{ mg kg}^{-1}$ sol entre 0 et 10 cm et $2,82 \text{ mg kg}^{-1}$ sol entre 10 et 20 cm) pour M1, relativement plus faibles et assez similaires pour M2 et NPK (1,81 et $2,19 \text{ mg kg}^{-1}$ sol respectivement) et plus faibles ($0,34$ et $1,33 \text{ mg kg}^{-1}$ sol) pour le témoin.

L'ordre de variation de N_{flush} selon les traitements est de : $M1 > M2 > NPK > T$ dans la couche 0-10 cm et de : $M1 > NPK > M2 > T$ dans la couche 10-20 cm.

Tableau VI.1 : Quantités ajustées de l'azote potentiellement minéralisable (Nd) (mg kg⁻¹ de sol) dans les horizons 0-10 et 10-20 cm Année 1995
 Chaque valeur est assortie de l'écart-type de la moyenne (Sx)

Profondeurs	Traitements	Nd mg kg ⁻¹ sol	K	R ²
0-10 cm	T	10,50 ± 0,19	0,107 ± 0,01	0,99
	NPK	43,05 ± 0,69	0,042 ± 0,005	0,99
	M1	42,13 ± 1,09	0,154 ± 0,01	0,99
	M2	41,89 ± 0,89	0,086 ± 0,003	0,99
10 - 20 cm	T	9,67 ± 0,67	0,104 ± 0,02	0,99
	NPK	36,73 ± 1,79	0,040 ± 0,01	0,99
	M1	40,06 ± 2,93	0,149 ± 0,02	0,99
	M2	36,60 ± 1,80	0,097 ± 0,01	0,99

Nd = quantité d'azote potentiellement minéralisable.

k = constante de vitesse de minéralisation de ce compartiment azoté du sol.

R² = coefficient de détermination

Tableau VI.2 : Azote total (N) et azote potentiellement minéralisable (Nd) (mg kg^{-1} sol) des sols.

Chaque valeur est assortie de l'écart-type à la moyenne (Sx).

Année 1995

n = 3

Profondeurs	Traitements	N	C/N	Nd	Nd/N x 100	Nflush	100Nflush/Nd	Nmi	Log2/k	K x Nd
		mg kg^{-1} sol			%	mg kg^{-1} sol	%	mg kg^{-1} sol	semaine	Np semaine^{-1}
0 - 10 cm										
	T	380 ± 19,6	11,34	10,50 ± 0,18	2,7	0,34 ± 0,02	3,2	3,16 ± 0,25	2 - 3	1,1
	NPK	670 ± 23,8	12,13	43,05 ± 0,69	6,4	0,36 ± 0,04	2,3	6,37 ± 0,04	2 - 3	1,00
	M1	1000 ± 57,3	13,5	42,13 ± 1,09	4,2	4,17 ± 0,31	9,9	4,55 ± 0,17	2 - 3	6,50
	M2	740 ± 21,4	11,14	41,89 ± 0,89	5,6	1,00 ± 0,06	2,4	5,88 ± 0,49	3 - 4	3,6
10-20 cm										
	T	365 ± 11,2	11,23	9,67 ± 0,67	2,6	1,33 ± 0,08	13,7	4,06 ± 0,34	2 - 3	1,00
	NPK	585 ± 15,7	12,05	36,73 ± 1,79	4,7	2,19 ± 0,17	7,9	5,90 ± 0,38	2 - 3	1,50
	M1	745 ± 20,1	12,88	40,06 ± 2,93	4,3	2,82 ± 0,23	8,8	4,83 ± 0,34	2 - 3	6,00
	M2	647,5 ± 25,9	10,89	36,60 ± 1,80	4,6	1,81 ± 0,10	6	5,55 ± 0,37	3.	3,5

Nd = azote potentiellement minéralisable; Nmi = azote minéral initial; Nflush = azote flush; Log2/k = demi-vie de Nd exprimée en semaine; K x Nd = quantité d'azote minéral produite par semaine.

1.5- DISCUSSION

1.5.1- Dynamique de l'azote minéral (ammoniacal et nitrique) dans le sol

Au cours de toute la saison culturale, il y a eu prédominance du N ammoniacal sur le N nitrique. Ceci peut être attribué à l'acidité du sol ($pH_{eau} : 3,9-5,2$). La forte acidité aurait limité la nitrification ou accru la dénitrification.

D'après BERNHARD-REVERSAT (1981), la nitrification est partiellement inhibée par des températures élevées conduisant à une accumulation de N ammoniacal à 36°C. Cette température est proche de celle de la station de recherche où le maximum thermique de l'air mesuré varie entre 32 et 34°C.

STANFORD et SMITH (1972), puis CAMBELL et SOUSTER (1982), trouvent que cette inhibition de la nitrification ne se produit qu'à partir de 40°C et que la température normale de minéralisation se situe autour de 28°C ($28 \pm 2^\circ C$).

L'accroissement de la minéralisation pendant la première phase de minéralisation dans l'année, s'explique par l'installation des pluies entre mars et avril (figure VI.1) ; l'humidité du sol ayant augmenté (annexe VI.1d) a créé des conditions favorables à la reprise de vie des micro-organismes donc à la minéralisation. Ce flush de minéralisation en début de saison des pluies est dû au changement d'état du sol, passant de la dessiccation causée par la longue saison sèche (trois à quatre mois) à l'humectation du sol due à la reprise des pluies. C'est l'effet "Birch" du nom de son auteur BIRCH (1960), qui a mis en évidence l'héminéralisation due à la succession dessiccation-humectation. Ce changement dans l'humidité du sol occasionne une relance de l'activité biologique provoquant une augmentation des teneurs en N minéral avec la réhumectation du sol. BACYE (1993) a observé ce flush de minéralisation 20 jours après la reprise des pluies. D'autres auteurs tels que, BLONDEL (1971a), PICHOT et al. (1974), BERNHARD-REVERSAT (1977), GIGOU (1983) et WANEUKEM et al. (1995) l'ont également observé. Selon BERNHARD-REVERSAT (1981), la minéralisation de l'azote au cours de la saison de pluie est contrôlée par l'humidité du sol.

Le déclin de N minéral qui caractérise la deuxième phase (tout le mois de mai) serait dû principalement à l'absorption par le maïs en période de floraison (période d'exigence maximum).

La troisième phase (juin à août dans la couche 0-10 cm, juillet entre 10-20 cm et août à septembre dans la couche 20-40 cm) caractérisée par les plus faibles teneurs de N minéral dure 30 jours et coïncide avec la fin de la première saison des pluies et l'installation de la petite saison sèche. Elle correspond à une régression de l'activité biologique due à la diminution de l'humidité du sol et à une faible absorption du maïs parvenu en maturité. Selon BONDE et ROSSWALL (1987), cette phase serait due à la diminution du Nd.

La quatrième phase (août à septembre) se caractérise par une reprise de l'accroissement de N minéral suite au démarrage de la petite saison des pluies et à la récolte du maïs.

Le pic de N minéral qui est atteint en mai à 0-10 cm de profondeur, se produit en juin, 30 jours après, dans la couche 10-20 cm puis 60 jours après dans la couche 20-40 cm. Ce décalage des pics de minéralisation vers la profondeur pourrait s'expliquer soit par l'évolution de l'humidité vers la profondeur faisant déplacer ainsi le siège du regain d'activité biologique, soit par une translation dans le temps du pic de minéralisation due à la lixiviation.

On peut retenir en conclusion que globalement, l'évolution des teneurs d'azote minéral n'est pas modifiée par les traitements, mais suit l'humidité du sol qui est sous la dépendance de la hauteur et de la fréquence des pluies. Ce qui semble indiquer que la dynamique de décomposition du *Mucuna* ou la minéralisation de l'azote in situ est soumise à l'influence déterminante des conditions climatiques.

La minéralisation in situ revêt un caractère saisonnier déterminé par la répartition des pluies dans l'année et son évolution est indépendante des traitements ou systèmes de culture (BLONDEL, 1971). Qu'en est-il de N minéralisé au laboratoire ou de Nd ?

1.5.2- Effets des traitements sur la dynamique de l'azote potentiellement minéralisable (Nd)

Les coefficients de détermination de Nd très élevés ($R^2 = 0,99$) témoignent de la justesse de l'ajustement réalisé.

Les résultats font remarquer dans la couche 0-10 cm que le traitement T qui procure le plus faible Nd ($10,5 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ sol}$) a cependant une constante de vitesse de minéralisation (k) relativement élevée (0,11). Par contre, le traitement NPK qui apporte le Nd le plus élevé ($43 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ sol}$) a une constante de vitesse de minéralisation relativement faible (0,04). Ces résultats, comparés aux variations de N total du sol ($M1 > NPK > M2 > T$) et aux variations de Nd ($NPK > M1 > M2 > T$) amènent à suggérer que la vitesse de minéralisation est peu

dépendante de N total et du Nd. SULCE (1993) dans la région de Myzeque en Albanie a aboutit à des résultats similaires. Le test de NEWMAN-KEULS (annexe VI.4) permet de comparer des valeurs Nd des différents traitements.

Selon ce test, les valeurs de Nd pour NPK, M2 et M1 ne sont pas significativement différentes ; par contre, elles le sont vis-à-vis du témoin. Les trois modes de gestion du sol entraînent donc une amélioration du taux de Nd par rapport à la culture traditionnelle sur brûlis. De même, les valeurs de N minéral initial (Nmi) pour NPK et M2 ne sont pas significativement différentes. Il en est de même des valeurs de Nflush ce qui amène à dire que ces systèmes de culture sont équivalents du point de vue de la quantité et de la capacité de fourniture de Nd au sol.

La production moyenne de Nd semaine⁻¹ ($N_p \times k$) varie suivant les traitements . Elle est plus élevée pour M1 (6,5 mg N kg⁻¹ sol semaine⁻¹) que pour NPK (1,8 mg N kg⁻¹ sol semaine⁻¹) et M2 (3,6 mg N kg⁻¹ sol semaine⁻¹) à 0-10 cm et prouve l'efficacité du système *Mucuna*-maïs dans l'amélioration notable du niveau du Nd dans les sols.

Les valeurs relatives de Nd par rapport à N total sont dans 0-10 cm pour T, NPK, M1 et M2 respectivement 2,7%, 6,4%, 5,6% et 4,7%. La demi-vie ($\text{Log}2/k$) de ce compartiment de N est très courte ; elle varie de 2 à 3 semaines pour tous les traitements ;

- les valeurs du flush de minéralisation sont également faibles puisqu'elles correspondent à 2,3 - 9,9% de Nd dans la couche 0-10 cm.

On note également que le flush de minéralisation est relativement plus élevé dans les deux systèmes (M1 et M2) *Mucuna*-maïs (3,5 mg kg⁻¹ sol pour M1 et 1,40 mg kg⁻¹ sol pour M2). Ce constat démontre un effet bénéfique du système maïs-*Mucuna* sur le flush de minéralisation (Nflush).

Par ailleurs, il existe une relation étroite et significative entre Ntotal et Nflush ($R^2 = 0,99$). Ce qui indique, dans ces sols à faible teneur en matière organique, que l'azote total peut être considéré comme un indicateur du flush de minéralisation.

Dans la couche 10-20 cm, le Nd , quel que soit le traitement varie dans le même sens que l'azote total et la production d'azote minéral par semaine. Ce qui peut amener à prévoir grossièrement que l'azote total pourrait également être considéré comme un indicateur du potentiel de minéralisation et de la production d'azote minéral par semaine.

2- INFLUENCE DU SYSTEME *MUCUNA*-MAÏS SUR LE BILAN DE L'AZOTE DANS LE SYSTEME SOL-PLANTES

2.1- Objectif

Dans les chapitres précédents, nous avons mesuré, pour les quatre systèmes de culture étudiés,

- le niveau des productivités végétales du maïs et du *Mucuna*,
- le niveau des restitutions minérales au sol par la fertilisation chimique et organique au moyen des résidus de récolte du maïs et de la litière du *Mucuna*.
- la dynamique (vi) de l'azote minéral à travers les stocks d'azote mobilisable et d'azote mobilisé dans les sols.

Dans ce paragraphe, nous utilisons une partie de ces résultats et des données obtenues dans le cadre de ce travail et de celles de la littérature pour évaluer l'effet des différents modes de gestion du sol mis en oeuvre, sur le bilan de l'azote dans le système sol-plantes.

2.2. Méthodologie

La méthodologie utilisée dans cette étude est inspirée de celle décrite par WETSELAAR et GANRY (1982). Elle est fondée sur la méthode des bilans, appliquée aux résultats d'un essai de longue durée. La présente étude, étant réalisée de 1988 à 1996, se situe bien dans le cadre de ce genre d'essai.

Le dispositif expérimental et les traitements sont décrits dans le chapitre II, tandis que les méthodes d'analyse utilisées sont exposées, pour les plantes dans le chapitre III et pour le carbone et l'azote dans le chapitre IV. Sur l'ensemble des traitements, seuls les épis avec rafles sont exportés des parcelles. Le N total plante exporté (N_{ex}) ou recyclé est le produit du rendement (grains + rafles) exprimé en $kg\ MS\ ha^{-1}$ et de la teneur en N de ces organes.

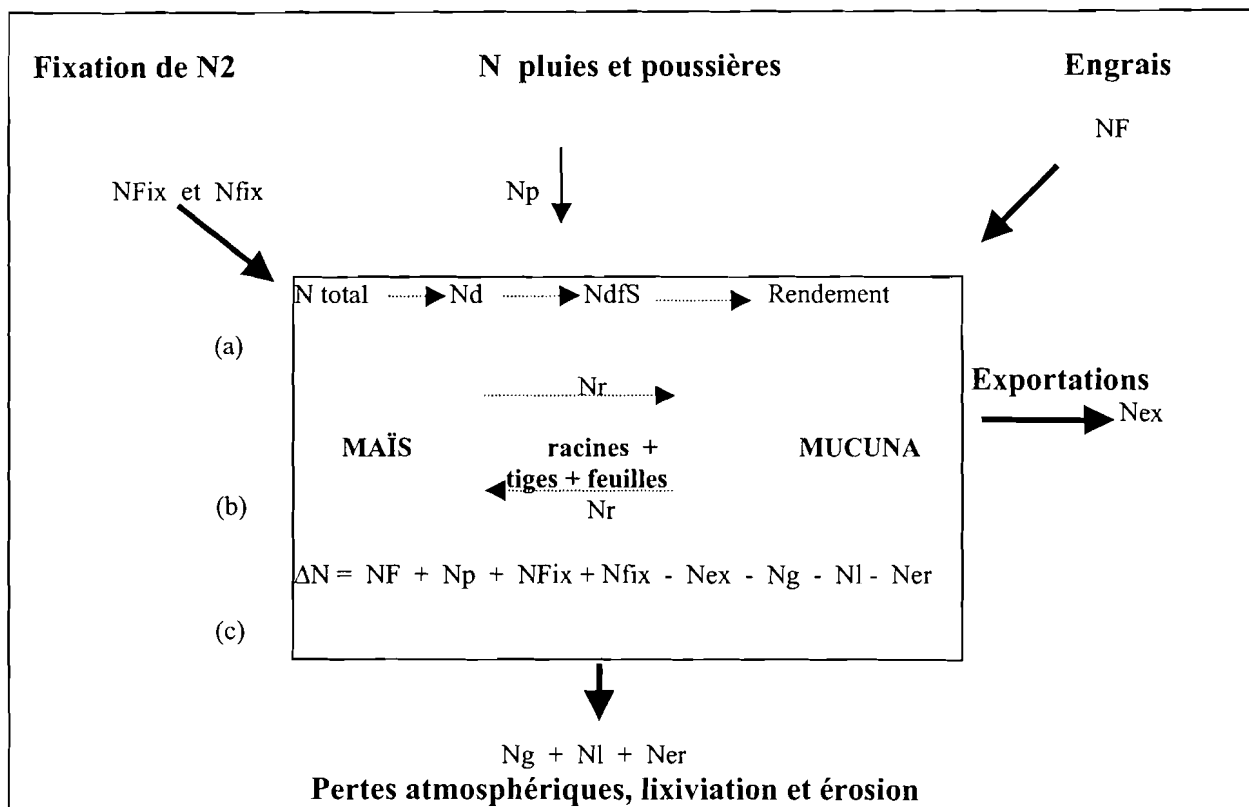


Figure VI.3 : Schéma représentant les entrées et sorties de N dans le système de culture Mucuna-maïs et son fonctionnement interne - ligne (a) : rôle central du pool d'azote minéralisable (Nd) dans la formation du rendement ; ligne (b) : transferts internes ; ligne (c) : équation du bilan.

Nt : Azote du sol

Np : Azote provenant des pluies et poussières

Ndfs : Azote de la plante provenant du sol (N derived from fertilizer)

NFix : Azote provenant de la fixation symbiotique de N₂

Nfix : Azote provenant de la fixation libre et rhizosphérique de N₂

Nd : Azote disponible : pool d'azote minéralisable (quantité d'azote minéralisable à la disposition d'une culture de la levée à la récolte).

Nr : Azote provenant des restitutions par la culture (racines + tiges + feuilles)

NF : Azote total de l'engrais

Nex : Azote exporté par les cultures

Ng : Azote volatilisé et dénitrifié (NH₃, N₂O et N₂)

NI : Azote lixivié

2.2.1- Rappel de la méthode du bilan

$$\Delta N = \sum \text{entrées} - \sum \text{sorties}$$

Entrées :

- Fixation de N₂
 - * symbiotique (NFix)
 - * libre (Nfix)
- Apport de N par les pluies et les poussières (Np)
- Apport de N par l'engrais (NF)

Ces inputs sont désignés Y dans l'équation du bilan

Sorties :

- Exportations du maïs (Nex) que nous désignons par Z dans l'équation des bilans
- Pertes globales que nous désignons par X dans l'équation du bilan (voir Fig. VI.3).

Dans l'équation du bilan, les outputs sont représentés par X (outputs inconnus ou pertes globales) et Z (outputs connus).

2.2.2- Mise en équation et calcul des pertes

$$X = \sum \text{sorties inconnues} = \text{pertes totales de N hors du système sol-plante durant n années de } t_0 \text{ à } t_n$$

$$Y = \sum \text{entrées} = \sum Np + \sum N\text{Fix} + \sum N\text{fix} + \sum NF$$

de t₀ à t_n

$$Z = \sum \text{sorties connues} = \sum N \text{ total plante exporté}$$

$$\Delta N \text{ sol (0-20 cm)} = N \text{ total sol (0-20 cm) au temps } t_n - N \text{ total sol (0-20 cm) au temps } t_0$$

Ces différentes variables vérifient la relation suivante :

$$X = Y - Z - \Delta N_{sol}$$

Si le système sol-plante est à l'équilibre organique, $Y = X + Z$ et $\Delta N_{sol} = 0$

Les entrées et sorties sont schématisées sur la figure VI.3.

2.3- RESULTATS

2.3.1-Calcul des entrées

Les résultats des calculs sont consignés dans le tableau VI.3

-Fixation symbiotique de N_2 (NFix)

L'évaluation de NFix suppose en préalable de connaître la quantité de N total produite et recyclée par le *Mucuna* (hypothèse 1). Une fois cette donnée connue, il importe ensuite d'évaluer le %NFix moyen (hypothèse 2).

*Evaluation de N total sur MS du *Mucuna* (hypothèse 1)

Parties aériennes

D'après TRIOMPHE (1996), la quantité de litière de *Mucuna* (vivante et morte) produite varie de 10 à 14 t MS ha⁻¹ an⁻¹. Nos mesures indiquent une biomasse végétale de 11 t MS ha⁻¹ an⁻¹ (rappel tableau III.1). Cette mesure ayant été faite à une période (octobre) où la litière a déjà amorcé sa décomposition, nous considérons que nous sommes dans une situation proche de celle de TRIOMPHE, et tablons sur une production maximale de 14 t MS ha⁻¹ an⁻¹, soit 370 kg N ha⁻¹ an⁻¹.

Tableau VI.3 : Somme des entrées de N ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) dans le système Mucuna-maïs entrant dans le calcul du bilan de N, selon les traitements. Essai au champ Mucuna-maïs, Agonkanmey. 1988-1995

Termes du bilan ($\text{kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	Traitements			
	T	NPK	M2	M1
NF	0	76	0	0
Np	9	9	9	9
NFix	0	0	175	350
Nfix	2,0	5,0	20	30
$Y = \sum$ entrées de N	11	90	204	389

NF = N engrais;

Np = N apporté par les poussières et les pluies

NFix = fixation symbiotique

Nfix = fixation libre et rhizosphérique

Les modes de calcul ou d'estimation des données chiffrées sont explicités dans le paragraphe 2.3.1.

Parties racinaires

Nos résultats donnent 2,5 t MS ha⁻¹ an⁻¹ et 2,0% de N (rappel tableau III.1). Comme pour les parties aériennes, il est vraisemblable que la production racinaire maximale soit supérieure à 2,5 t. Nous admettons que l'évolution de la biomasse racinaire suit celle des parties aériennes, à savoir : $2,5 \times 14/10 = 3,5$ t MS ha⁻¹ an⁻¹, soit N total racine = 70 kg N ha⁻¹ an⁻¹

*Evaluation de %NFix du *Mucuna* (hypothèse 2)

On sait que dans un milieu pauvre en N minéral, la fixation de N₂ est élevée les premières années. Ensuite, le sol s'enrichissant en N minéralisable, le %Nfix diminue (GANRY, 1990 et SANGINGAN et al., 1996). Nous ferons l'hypothèse d'une variation dans le temps de NFix de 90 à 60%, soit un NFix moyen de 75%. Ce niveau moyen est en accord avec celui indiqué par GILLER et WILSON (1991) qui trouvent que les légumineuses telles que *Pueraria*, *Desmodium* et *Centrosema*, du groupe cowpea dont fait partie le *Mucuna*, ont des niveaux de fixation compris entre 70 et 90%. Par ailleurs nos observations faites sur la nodulation montrent de nombreux nodules tous efficaces (couleur rouge), traduisant une fixation de N₂ élevée.

Calcul de NFix (kg ha⁻¹ an⁻¹)

NFix = N total (parties aériennes et racinaires) x %NFix

Nfix = 440 x 0,75 = 350 kg N ha⁻¹ an⁻¹ pour M1 et 350/2 = 175 kg N ha⁻¹ an⁻¹ pour M2.

-Fixation libre de N₂ (Nfix)

Selon GANRY (1990) qui l'a estimée pour des systèmes de culture "conventionnels" au Sénégal, elle varierait de 2 à 7 kg ha⁻¹ an⁻¹ suivant le niveau d'intensification du système de culture. Appliquée à notre cas, elle serait de 5 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour le niveau semi-intensif NPK et de 2 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour le niveau extensif T. Pour les traitements M1 et M2, nous ferons une estimation fondée sur la quantité de biomasse végétale (Q) produite annuellement et recyclée

Tableau VI.4: N total du sol (g N kg^{-1}) et variation de N total ($\Delta\text{N sol kg ha}^{-1}$) au cours du temps ($t_0 - t_n$) des traitements. Essai au champ Mucuna-maïs, Agonkanmey.

1988-1995

Ntotal sol (g kg^{-1}) et $\Delta\text{N sol (kg ha}^{-1}\text{)}$	Traitements							
	T		NPK		M2		M1	
	t_0	t_n	t_0	t_n	t_0	t_n	t_0	t_n
N sol 0-20 cm (1)	0,49	0,18	0,44	0,49	0,42	0,53	0,39	0,81
N sol 0-40 cm (2)	0,42	0,21	0,37	0,43	0,37	0,48	0,35	0,69
$\Delta\text{N sol (1)}$	-911		146		326		1176	
$\Delta\text{N sol (2)}$	-1277		360		660		2013	

$\Delta\text{N sol}$ = variation de N de t_0 à t_n

(1) Si l'on considère la couche 0-20 cm

(2) Si l'on considère la couche 0-40 cm

Chaque donnée est la moyenne de 10 répétitions correspondant aux 10 mini-parcelles de récolte et de prélèvement de sol, par bande de culture.

dans le sol (donc source de carbone pour les micro-organismes fixateurs). Sur la base d'une valeur de Q égale à 30 t MS ha⁻¹ an⁻¹ (*Mucuna* + maïs) correspondant à 13 t de carbone et un rendement de la fixation de N₂ par défaut de 0,1% (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970), nous estimons donc la fixation à 30 kg N ha⁻¹ an⁻¹ pour M1 et à 20 kg N ha⁻¹ an⁻¹ pour M2.

-Azote apporté par les poussières et les pluies (N_p)

L'azote apporté par les poussières n'a pu être évalué à la station d'essai, à défaut de matériels adéquats. Les données utilisées ici sont des évaluations de ROOSE (1981) au Burkina Faso et en Côte d'Ivoire. Selon lui, l'azote apporté par les poussières et les pluies peut atteindre 5,4 kg N ha⁻¹ an⁻¹ sous 860 mm et 12,2 kg N ha⁻¹ an⁻¹ sous 1350 mm respectivement. Sous une pluviométrie de 1100 à 1200 mm qui est celle de la station d'Agonkanmey ; on peut estimer alors l'apport d'azote par les pluies et les poussières à une valeur moyenne de 8,8 kg ha⁻¹ an⁻¹, tous traitements confondus.

- Azote apporté par la fertilisation minérale (N_F)

Le traitement NPK seul bénéficie de cet apport qui est de 76 kg N ha⁻¹ an⁻¹ correspondant à 200 kg ha⁻¹ an⁻¹ de NPK (15-15-15) et 100 kg ha⁻¹ an⁻¹ d'urée (46%N).

2.3.2- Calcul de ΔN sol

Les résultats de ΔN sol de t₀ à t_n sont consignés dans le tableau VI.4 et illustré par la figure VI.4.

Les résultats montrent que les valeurs de ΔN sol dans les deux couches sont négatives pour T, ce qui indique que le sol s'est appauvri, et positives pour les autres traitements (le sol s'est enrichi).

On remarque également la forte perte en azote du sol du témoin, principalement au cours des 4 premières années (voir annexe VI.5)

2.3.3- Calcul des sorties

- Sorties connues (Z)

Les sorties connues concernent l'exportation par les récoltes désignée par Nex (voir annexe VI.6).

Les valeurs de Nex (Z) pour les 8 années d'essais sont rappelées dans le tableau VI.5. Elles diminuent selon les traitements dans l'ordre décroissant suivant : $M1 > NPK > M2 > T$.

- Sorties inconnues (X)

Les deux termes Y et Z étant connus ainsi que ΔN sol, il nous est possible d'évaluer les sorties inconnues (X) correspondant aux pertes globales.

2.3.4- Calcul de X

Les valeurs de X sont déterminées en prenant en compte les couches 0-20 cm et 0-40 cm. Elles sont consignées dans le tableau VI.5.

Si l'on considère les couches 0-20 cm et 0-40 cm, ces valeurs sont toutes positives, ce qui indique que pour tous les traitements appliqués, le système sol-plante perd chaque année de l'azote (en fait, il est normal dans un sol cultivé qu'il y ait des pertes en dehors des exportations, quel que soit le niveau des entrées de N), et le niveau des pertes varie avec les traitements. Dans le traitement témoin qui correspond à une agriculture minière, la perte épuise le sol ($\Delta N < 0$) ; dans les traitements avec *Mucuna* (M1 et M2), les pertes sont dues à l'abondance de N dans le système, en excès par rapport aux besoins. En prenant en compte la couche 0-20 cm, les pertes exprimées en $\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sont respectivement de 195, 134, 122, et 49 pour M1, M2 et T et NPK. Mais si l'on considère la couche 0-40 cm, elles sont de 168, 93, 90 et 23 $\text{kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour, T, M2, M1 et NPK respectivement. On voit donc que le bilan de N diffère suivant la profondeur de sol prise en compte, ce qui s'explique du fait que les traitements modifient le sol en profondeur (fig.VI.4 et rappel fig. IV.3). Nous retiendrons la couche 0-40 cm qui permet d'assurer un bilan en N plus rigoureux que la couche 0-20 cm.

Tableau VI.5 : Evaluation des différents termes de l'équation $X = Y - Z - \Delta N$ permettant d'estimer les pertes globales. Essai au champ Mucuna-maïs, Agonkanmey. 1988-1995

Termes du bilan (kg ha ⁻¹)	Traitements			
	T	NPK	M2	M1
Y	88	720	1552	2952
Z	21	177	151	216
ΔN (1) 0-20 cm	-911	146,0	325,6	1176
ΔN (2) 0-40 cm	-1276	360	660,0	2013,0
Pertes N X (1)	978	397	1076	1560
Pertes N X (2)	1343	183	741	723
Pertes annuelles (1)	122	49	134	195
(2)	168	23	93	90
N er	13	13	10	6

ΔN = variation de N total de t0 à tn dans le sol

Y = somme totale des entrées de N

Z = N exporté par la plante

X = somme totale des sorties inconnus

(1) si l'on considère la couche 0-20 cm (2) si l'on considère la couche 0-40 cm

Ner = N perdu par érosion

Nous pouvons comparer ces pertes à celles occasionnées par l'érosion : l'érosion exprimée en $\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, respectivement pour T, NPK, M2 et M1, est de 13 (8%), 13 (56%), 10 (11%) et 6 (6,5%) des pertes. L'érosion est donc bien un phénomène qui appauvrit le sol en azote mais qui est secondaire par rapport aux autres causes de pertes qu'il reste à identifier (lixiviation et/ou pertes par volatilisation et/ou par dénitrification). Même dans le traitement NPK, l'érosion reste faible en valeur absolue ; et si, en valeur relative, ces pertes sont élevées, c'est dû à la valeur relativement élevées des pertes.

2.4 DISCUSSION

Notre discussion portera sur la validité de l'estimation du % NFix moyen du mucuna, un des termes de l'équation du bilan.

Les deux inconnus majeures dans cette équation du bilan sont le %NFix et les pertes.

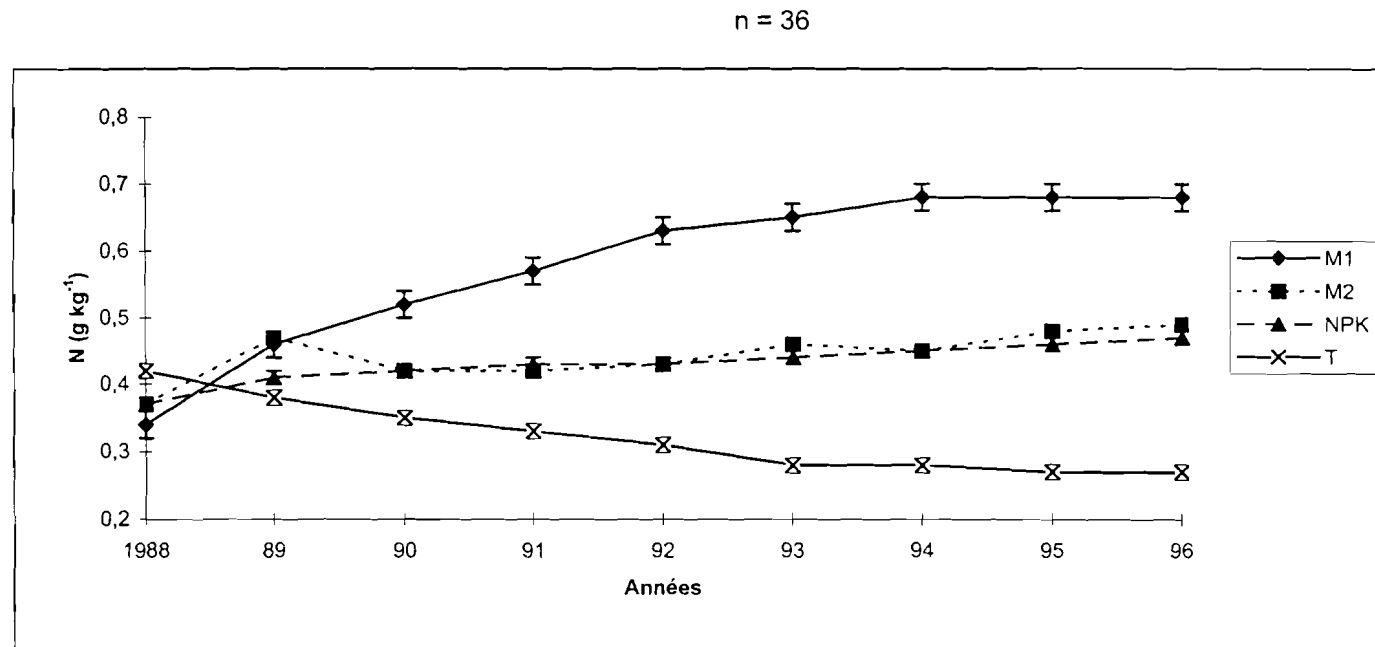
Faisant une hypothèse sur la valeur de l'une, on peut en déduire l'autre, nous faisons trois hypothèses :

1 - hypothèse %NFix moyen = 75% : c'est l'hypothèse qui nous semble la plus vraisemblable, que nous avons retenue, et sur laquelle sont basés nos calculs au § 2.3.4 et nos conclusions;

2 - hypothèse %Fix moyen < 75% : deux raisons rendent peu vraisemblable cette hypothèse : (i) on observe que le N total du sol dans le traitement M1 augmente régulièrement et considérablement au cours du temps ($+ 400 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) dans 0-40 cm ; dans un sol carencé en N au départ, cette augmentation atteste d'une fixation de N_2 , la seule source de N dans le système, très élevée et valide l'hypothèse d'un %NFix d'au moins 90% au début ; sur 8 ans, même en admettant une forte baisse de la fixation au cours du temps, il est difficile d'envisager un %NFix moyen inférieur à 75% ; (ii) pour permettre au *Mucuna* de produire $440 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, la production que nous avons mesurée, sur la base d'un %NFix de 90, la fourniture de N par le sol doit être au minimum de $44 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Ndfs). Ce Ndfs semble être une valeur maximum de fourniture de N par le sol, car le sol est carencé en N ; ceci écarte l'hypothèse d'une %NFix < 90 la première année ;

3- hypothèse pertes de N nulles : en prenant en compte les données suivantes se rapportant aux 4 premières années : le N total du *Mucuna* et du maïs (rappel tableau III.2), le ΔN sol (tableau VI.4) et les apports de N par l'atmosphère et par la fixation libre de N_2 , (tableau VI.3), l'équation du bilan donne un %NFix annuel moyen de 85% ; en appliquant la même méthode de calcul aux 8 années d'essai, le %NFix annuel moyen est de 55%.

Figure VI.4 : Variation interannuelle des teneurs d'azote total (g kg^{-1} sol) dans la couche 0-40 cm selon les traitements. Chaque point est assorti de l'écart type de la moyenne (S_x).



Compte tenu du %NFix de 85% les 4 premières années, le %NFix des 4 années suivantes devrait être de 25% pour permettre une moyenne de 55% sur les 8 ans. On montre bien par là que pour que les pertes de N soient nulles, il faut que le niveau de %NFix soit faible surtout après les 4 premières années de culture du mucuna ; bien que peu vraisemblable, cette hypothèse d'une fixation faible ou d'une fixation décroissant très rapidement demande à être cependant vérifiée.

2.5- CONCLUSION

L'évaluation des bilans azotés des différents systèmes de culture (T, NPK, M2 et M1) étudiés a permis de dégager un certain nombre d'enseignements importants quant au maintien de la fertilité des sols ferrallitiques de terres de barre cultivés au Sud-Bénin.

L'ensemble des traitements modifie le sol en profondeur ; la prise en compte de la couche 0-40 cm permet d'assurer un bilan en azote plus rigoureux que la couche 0-20 cm. En se basant sur une hypothèse de fixation de N₂ du mucuna de NFix = 75%, par ordre décroissant des pertes, on a : T > M1 > M2 > NPK.

Ces bilans montrent que la couverture du sol par le *Mucuna* réduit les pertes globales d'azote à la parcelle par rapport à la culture traditionnelle non fertilisée (90 versus 168), mais les augmente considérablement par rapport à la culture fertilisée avec NPK et l'urée (90 versus 23). Elle réduit également les pertes par érosion qui passent de 13 kg (système de culture traditionnelle), à 6kg N ha⁻¹ an⁻¹ (système *Mucuna*-maïs).

Ces pertes d'azote, outre les conséquences sur la baisse de fertilité azotée du sol, peuvent induire une pollution de la nappe phréatique ou accroître l'émission des gaz à "effets de serre" par dénitrification (libérant du N₂O). Cette étude montre l'intérêt de la couverture végétale du sol d'un point de vue agronomique certes, mais laisse entrevoir un risque en rapport avec l'excès de N.

Cependant, il faut considérer ces bilans comme estimatifs car dans l'évaluation des différents bilans azotés des systèmes de culture, un certain nombre de termes ont été estimés, notamment dans l'évaluation des entrées (fixation symbiotique de N₂, fixation libre de N₂ et apport atmosphériques). Mais la validité du bilan repose surtout sur la précision de ΔN sol. De ce fait, le bilan est d'autant plus précis que le nombre d'années d'essai est élevé.

Perspectives

Deux thématiques de recherches sont à développer en priorité :

- 1- évaluer la fixation de N_2 (%Nfix) du *Mucuna* au cours du temps ;
- 2- évaluer le rendement de la fixation de N_2 libre dans le sol en fonction des apports de carbone (rappelons que ce sol reçoit annuellement des quantités très importantes de carbone, environ $13 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$).

CONCLUSION GENERALE

L'étude des variations du statut organique des sols ferrallitiques de terre de barre soumis à différents systèmes de culture en condition de terrain et de laboratoire a fourni un ensemble de résultats pouvant aider à mieux comprendre le fonctionnement du système *Mucuna*-maïs (M1).

L'étude de l'hétérogénéité des sols des parcelles mises en essai, affiche des coefficients de variation des taux de C et N assez faibles à l'intérieur de chaque parcelle et même toutes les parcelles réunies. Ces résultats témoignent d'une bonne homogénéité non seulement à l'intérieur de chaque parcelle mais également d'une parcelle à l'autre. Ce qui permet de conclure à l'homogénéité de l'ensemble des parcelles.

Le système *Mucuna*-maïs accroît la production végétale et améliore ainsi le niveau de restitution organique et minéral au sol.

Le traitement "couverture permanente du sol" (M1) apporte annuellement au sol 26 t MS ha⁻¹, 13 t C ha⁻¹ et 430 kg N ha⁻¹. L'importance des restitutions de M1 est due aux stocks produits par le maïs et le *Mucuna*, ayant comme conséquence un apport au sol de N, P et K plus important et directement assimilable. Le paillis ainsi constitué à la surface du sol réduit considérablement les pertes par érosion et met à la disposition du maïs une part importante des quantités d'éléments libérés par la minéralisation du maïs et du *Mucuna*.

Le traitement NPK, apporte au sol en moyenne 11,440 t MS ha⁻¹ an⁻¹, 5,960 t C ha⁻¹ an⁻¹, 0,140 t N ha⁻¹ an⁻¹. Ce niveau élevé de restitution est imputable à la mise à disposition du maïs des éléments minéraux N, P et K directement assimilables et des résidus de récolte qui en augmentant tous les ans assure une productivité durable au sol.

Le traitement M2 (année à effet *Mucuna*) apporte au sol 11,050 t C ha⁻¹ an⁻¹ et 0,4 t N ha⁻¹ an⁻¹. Alors que l'année où le maïs est sans effet *Mucuna*, le niveau de restitution chute à 3,68 t C ha⁻¹ an⁻¹ et 0,13 t N ha⁻¹ an⁻¹.

- Le traitement témoin restitue au sol en moyenne 1250 kg MS ha⁻¹ an⁻¹, 650 kg C ha⁻¹ an⁻¹ et 5 kg N ha⁻¹ an⁻¹ qui sont des stocks relativement plus faibles.

Par rapport aux propriétés des sols, les résultats montrent que la culture traditionnelle continue entraîne un appauvrissement du sol en C et N et en éléments minéraux ; la conséquence évidente en est la baisse régulière des productions végétales. Par contre, le système *Mucuna*-maïs (M1) fait accroître de façon progressive et significative le stock organique et minéral du sol en particulier le système M1 qui produit une litière importante qui se décompose sur place. Ce système de décomposition in situ de la biomasse des plantes de couverture augmente la production de matière organique d'origine racinaire (exsudats et

produits de décomposition des racines) qui a l'avantage sur la matière organique issue du paillis d'être répartie dans le profil.

L'effet des autres traitements M2 et NPK fait accroître également les taux de matière organique mais dans une proportion moindre par rapport à M1.

Il se dégage donc de l'ensemble des résultats obtenus les points suivants :

- les systèmes de culture utilisés à travers les traitements modifient la plupart des caractères des sols ;
- les modifications se produisent essentiellement dans la couche de surface du sol ;
- la culture traditionnelle continue de maïs conduit à une dégradation de la structure de surface et acidifie le sol ;
- le système *Mucuna*-maïs (M1) relève assez vite le niveau général de fertilité du sol et améliore sa structure ;
- les systèmes M2 et NPK malgré leurs effets également sensibles sur la production et les caractères du sol, n'atteignent pas le niveau d'impact de M1.

Cependant, une récente étude de BARTHES et al. (1999) et LESAIN (1998) relative à l'effet du *Mucuna* sur le stock organique avec le ^{13}C en abondance naturelle a fait remarquer que les adventices participeraient de manière non négligeable (20 à 30%) au C total. Ces résultats obtenus au cours des essais montrent que le système *Mucuna*-maïs est particulièrement intéressant pour la gestion des terres dans le sud-Bénin, non seulement par rapport aux systèmes traditionnels (traitement T), mais aussi par rapport aux systèmes plus intensifiés avec fertilisation chimique (traitement NPK) (AZONTONDE et al. 1998).

.Globalement, les taux de C diminuent de la surface vers la profondeur du sol. Et si l'on se réfère aux modes de gestion des sols, le sens de variation des teneurs en C organique est le suivant : $M1 > M2 = NPK > T$.

Cela fait ressortir l'effet bien marqué du traitement M1 dans l'amélioration du taux de MOS

Tous traitements confondus, il existe une forte liaison ($r = 0,98$) entre les teneurs en C total et les rendements en maïs.

Une étude plus spécifique de la MOS a été faite à partir du fractionnement granulométrique et la variation de N minéral au champ et en laboratoire a conduit aux résultats suivants :

- bilans en masse, C et N acceptables, mais une dispersion incomplète de la fraction 0-20 μm ,
- le C et le N hydrosolubles représentent 6 à 20 % du C et de N totaux du sol ; ces valeurs assez élevées pour les sols ferrallitiques peuvent éventuellement s'expliquer en raison de leur acidité, hypothèse qui mériterait d'être confirmée ;

- les compartiments responsables des variations du stock organique en relation avec le mode de gestion des parcelles, sont prioritairement les fractions supérieures à 50 μm , et dans une moindre mesure, la fraction 2-20 μm .

La variation des taux de N minéral semble liée au régime pluviométrique et plus particulièrement à l'humidité du sol. Elle revêt un caractère strictement saisonnier, déterminé par la repartition des pluies dans l'année.

Le mode de gestion du sol basé sur le système *Mucuna*-maïs (M1) fournit au sol par rapport aux autres traitements, les taux de N les plus élevés ; cet effet se manifeste également sur le flush de minéralisation confirmant ainsi la fixation de N_2 élevée par le *Mucuna*.

En ce qui concerne l'azote potentiellement minéralisable (Nd), les valeurs ne sont pas significativement différentes pour les traitements NPK (43 $\text{mg kg}^{-1}\text{sol}$), M2 (42 $\text{mg kg}^{-1}\text{sol}$) et M1 (42 $\text{mg kg}^{-1}\text{sol}$), mais elles sont 4 fois plus élevées que le témoin (10,5 $\text{mg kg}^{-1}\text{sol}$). La production hebdomadaire (k.Nd) d'azote minéral est toujours nettement plus élevée pour M1 que pour les autres traitements. Ce qui indique l'impact bénéfique de ce système de culture sur l'augmentation de la potentialité de fourniture de N directement assimilable. Cette production semble liée, à l'exception de NPK, à l'azote total et au rendement.

Il existe une relation étroite et significative ($R^2 = 0,99$) entre le N total du sol et le N du flush. Ce qui indique que l'azote total peut être considéré comme un indicateur du flush de minéralisation.

Les bilans azotés des différents systèmes de culture (T, NPK, M2 et M1), calculés sur la base de la somme algébrique des flux d'entrée et de sortie de N du système sol-plante, ainsi que de la variation de N total dans le sol du début à la fin des essais, varient suivant les traitements quelle que soit la couche de sol (0-20 ou 0-40 cm) prise en compte. La variation de N total dans les sols, de 1988 à 1995 ($\Delta\text{N sol}$) a montré que le traitement témoin T appauvrit le sol en N ($\Delta\text{N sol} < 0$), tandis que le traitement conventionnel NPK et ceux à base de *Mucuna* (M1 et M2) l'enrichissent en N ($\Delta\text{N sol} > 0$). Les pertes en N hors du système sol-plante, varient de 23 à 168 $\text{N kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ dans l'ordre décroissant des traitements suivants :
 $\text{NPK} < \text{M1} < \text{M2} < \text{T}$

- pour le traitement témoin, elles épuisent le sol en azote,

- pour les autres traitements (M1, M2 et NPK), les pertes sont dues à l'abondance de N en excès par rapport aux besoins des plantes. Ces pertes en azote ont des conséquences que seule une fixation de N_2 élevée du *Mucuna* (75% sur 8 ans) permet d'expliquer (nous faisons l'hypothèse d'une fixation NFix moyen de 75% sur 8 ans) la forte augmentation en N total du sol (+400 $\text{N kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ sur 8 ans) dans le traitement M1.

Ces pertes d'azote, peuvent également induire une pollution de la nappe phréatique ou accroître l'émission des gaz à "effets de serre" par dénitrification (libérant du N_2O). Cette étude laisse entrevoir, l'intérêt agronomique de la couverture végétale du sol mais aussi un risque pour l'environnement.

Il a été noté également que, les résidus organiques constituent une source d'éléments minéraux non négligeables qui pourraient être encore mieux valorisés avec une production intermédiaire de biogaz .

La restauration des sols dégradés doit donc passer par une augmentation du stock organique à restituer par l'apport de débris végétaux, du compost, du fumier ou d'engrais minéral.

Mais il faudra malheureusement considérer ces bilans comme assez estimatifs car dans l'évaluation des différents bilans un certain nombre de termes n'ont pas pu être calculés notamment dans l'évaluation des "entrées azotées". Mais la validité du bilan dépend surtout de la précision de la valeur de ΔN sol.

Il a été noté également que la pratique du système *Mucuna*-maïs donne de nombreux avantages socio-économiques qui font que beaucoup de producteurs l'adoptent de plus en plus. Les rendements et les revenus augmentent rapidement et restent satisfaisants. Au menu des avantages s'ajoutent également les multiples effets sur l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols. L'exploitation de la même parcelle peut se faire pendant au moins dix ans sans baisse de rendement ; les profits augmentent d'année en année tandis que les coûts de production restent faibles.

Le système *Mucuna*-maïs procure 72% de revenu supplémentaire minimal annuel par rapport à la culture traditionnelle (début d'essais), un surplus de bénéfice correspondant à 36% et 48% des revenus obtenus dans l'utilisation des systèmes NPK et M2 respectivement.

C'est un système de culture que l'on peut qualifier de durable fondé sur l'expérience et l'utilisation du milieu naturel. Ce système par rapport à la culture traditionnelle, est un bon en avant dans la recherche des techniques de restauration et de gestion durable des sols (TRIOMPHE, 1996).

Il est particulièrement apprécié non seulement par rapport au système de culture traditionnelle mais également vis-à-vis du système amélioré de fumure minérale NPK et urée.

Cependant, il importe que les recherches en cours, notamment sur le marquage du carbone ainsi que sur le niveau de fixation symbiotique réel du *Mucuna* aboutissent afin de préciser

d'avantage la proportion et le rôle joué par les adventices dans cet effet améliorant des caractéristiques physico-chimiques et notamment du niveau azoté du sol, pour mieux apprécier la dynamique et les biogécocycles du carbone et de l'azote.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADDISCOTT (T.M.), 1983. - Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils differing histories. *Journal of Soil Science*, 34 : 343-353.

AKOBUNDU (I.O.), 1993. - Techniques de lutte intégrée contre les adventices dans la maîtrise de la dégradation des sols. *La Recherche à IITA n°6 mars 1993* p.11-16 Ibadan Nigéria IITA.

ALBRECHT (A.), 1987. - Matière organique et propriétés des sols cultivés tropicaux -effets de différents types de restitutions organiques. Dans les arbres fixateurs d'azote - l'amélioration biologique de la fertilité du sol. Actes des séminaires 17-25 mars, Dakar, Sénégal. p.536-571. Colloques et Séminaires, Edition de l' ORSTOM, Montpellier, France.

ANDERSON (D. W.), SAGGAR (S.), BETTANY (J. R.), STEWART (J. W. B.), 1981. - Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter : I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulfur. *Soil Sci. Soc. Am.*, 45 : 767-772.

ANDREUX (F.), BRUCKERT (S.), CORREA (A.), SOUCHIER (B.), 1980. - Sur une méthode de fractionnement physique et chimique des agrégats des sols : origines possibles de la matière organique des fractions obtenues. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 291D 381-384.

ARNON (I.), 1972. - "Crop production in dry regions" LEONARD HILL LONDON.

ARRIVETS (J.), 1976. - Exigences minérales du sorgho. Etude d'une variété voltaïque à grande tige. *Agron. Trop.* , 31(1) : 29-46.

ASSOGBA-KOMLAN (F.), 1996. - Effet d'un système maïs/légumineuse (*Mucuna pruriens* utilis) sur la matière organique d'un sol ferrallitique (terres de barre) au Sud-Bénin. DEA national de science du sol. INA Paris-Grignon, ENSA-Montpellier, ENSA-Rennes, LCSC-ORSTOM.

AZONTONDE (A.), 1993. - Dégradation et ressauration des Terres de Barre(sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Cah. ORSTOM, sér. Pédol. vol. XXVIII n°2 1993 : 217-226.

AZONTONDE (A.), 1998. -Le Mucuna et la restauration de la fertilité d'un sol ferrallitique au sud du Bénin. Agriculture et développement n° 18 Juin 1998 : 14-21.

BACYE (B.), 1993. - Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux et hydromorphes de la zone soudano-sahélienne (Province du Yatenga, Burkina Faso). Documents ORSTOM- Montpellier, 1993, n°6 243 p.

BALESDENT (J.), PETRAUD (J. P.), FELLER (C.), 1991. - Effet des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. Science du Sol, 29 : 95-106.

BARTHES (B.), KOUAKOUA (E.), SALA (G.H.), HARTMANN (C.), NYETE (B.), 1996. - Effet à court terme de la mise en culture sur le statut organique et l'agrégation d'un sol ferrallitique argileux du Congo. Canadian Journal of Soil Science (CAN), 76 : 493-499.

BARTHES (B.), BLANCHART (E.), LESAIN (S.), OLIVER (R.), 1998. - Interactions entre matières organiques, activités biologiques et propriétés physiques d'un sol ferrallitique cultivé au sud-Bénin. Conséquences pour la nutrition azotée d'un maïs. Intérêt des plantes de couverture. Rapport de mission de terrain n°1 du Programme de Recherche Sols et Erosion (PROSE). Projet 97 PROSE 28. CIRAD-IRD.

BARTHES (B.), BLANCHART (E.), GIRARDIN (C.), VILLENAUVE (C.), 1999.
- Interactions entre matières organiques, activités biologiques et propriétés physiques d'un sol ferrallitique cultivé au sud-Bénin. Conséquences pour la nutrition azotée d'un maïs. Intérêt des plantes de couverture. Rapport de mission de terrain n°2 du Programme de Recherche Sols et Erosion (PROSE). Projet 97 PROSE 28. CIRAD-IRD.

BATIONO (A.), KOALA (S.), AYUK (E.), 1998. - Role of inorganic and organic plant nutrients for sustainable crop production in West African Semi-Arid Tropics. 16th. World Congress of Soil Science. 20-26 août 1998 ; résumés 1 : p. 219.

BARTOLI (F.), BURTIN (G.), HERBILLON (A. J.), 1990. - Disaggregation and clay dispersion of oxisols. Na-resin, a recommended methodology for determining particle size distribution of oxisols rich in gibbsite. C. R. 14è Congr. Intern. AISS, Kyoto, Japon, 2 : 449-450.

BERNHARD-REVERSAT (F.), 1977. - Observation sur la minéralisation in situ de l'azote du sol en savane sahélienne (Sénégal). Cah. ORSTOM, Sér. Biol., vol. XII, n°4, 301-306.

BERNHARD-REVERSAT (F.), 1981. - Participation of light and organo-mineral fractions of soil organic matter in nitrogen mineralization in a sahelian savana soil. Zbl. Bakt, II Abt., 136, 281-290.

BEZUGLOVA (O.), MOROZOV (I.), 1998. - The change of humus status in the agricultural soils of Rostov region. 16th. World Congress of Soil Science 20-26 août 1998, résumés 1 : p. 220.

BLONDEL (D.), 1971. - Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote en sol sableux (Dior) au Sénégal. L'Agron. Trop., vol. XXVI, n° 12, 1303-1333.

BOIFFIN (J.), FLEURY (A), 1974. - "Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes". Ann. Agron. 25(4) 555-573.

BONDE (T.A.), ROSSWALL (T.), 1987. - Seasonal variation of Potential Mineralizable Nitrogen in Four Cropping Systems. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 51, 1508-1514.

BOYER (J.Y.), 1970. - Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone. Comité des Sols Tropicaux. Committee of Tropical Soil. Londres, 8-12 juin Ed. ORSTOM 175p.

- BROM (A.J.M.), VAN DER WAL (F.), 1988.** - Some leguminous green manure and pasture crops as an alternative nitrogen source in the tropics. Tanzania Research Institute, Mlingano Tanga-Tanzania. Miscellaneous Publication M10, p. 34--36.
- BRUCKERT (S.), KILBERTUS (G.), 1980.** - Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux de sols bruns et de chernozems. *Plant and Soil*, 57 : 271-295.
- BUCKLES (D.), 1995.** - Velvet bean : a "new" plant with a history. *Economic Botany*, 49(1) p.13-25 Mexico, Mexique, CIMMYT.
- BUNCH (R.), 1986.** - What we have learned to date about green manure crops for small farmers CIDICCO Tegucigalpa, Honduras in : Koudokpon V. , Versteeg M. , *Mucuna = solution pour les terres pauvres et les champs envahis par les chiendents.*
- BUNCH (R.), 1993.** - El de abonos verdes por los campesinos : lo que hemos aprendido hasta la fecha. CIDICO, Tegucigalpa, Honduras, 2da. edicion, in : Koudokpon V. , Versteeg M. , *Mucuna = solution pour les terres pauvres et les champs envahis par les chiendents.* Cotonou, IITA, 10 p. multigr.
- BUNCH (R.), 1995.** - The use of green manures by villagers : what we have learned to date. Technical report n°3, (second edition). Tegucigalpa, Honduras, CIDICCO.
- CALMES (J.), 1959.** - Le potassium et le magnésium dans les limbes du maïs. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 91-100.
- CAMBELL (C.A.), SOUSTER (W.), 1982.** - Loss of organic matter and potentially mineralizable nitrogen from Saskatchewan soils due to cropping. *Can. J. Soil Sci.*, 62 : 651-656.
- CAMERON (R.S.), POSNER (A.M.), 1979.** - Mineralizable organic nitrogen in soil fractionated according to particle size. *J. Soil Sci.*, 30, 565-577.

CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988. - Les états de surface dans la zone sahélienne.
Influence sur l'infiltration. Rapport CEE/ORSTOM, 202p.

CERRI (C.), FELLER (C.), BALESSENT (J.), VICTORIA (R.), PLENECASSAGNE (A.), 1985. - Application du traçage naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. C. R. Acad. Sci. Paris, 300, sér. II : 423-428.

CHABALIER (P.F.), 1976. - Contribution à la connaissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote-engrais dans un système sol-plante. Thèse Doct. Ing. Fac. Sci. Abidjan n° 33, 139p.

CHARREAU (C.), NICOU (R.), 1971. - L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-africaine et ses incidences agronomiques. Chap. IV. Les effets de l'intervention humaine sur le profil cultural et les rendements agricoles : le travail du sol avec ou sans enfouissement de matière végétale. Agron. Trop. 26, 1183-1247.

CHARREAU (C.), 1972. - Problème posé par l'utilisation agricole des sols tropicaux par les cultures annuelles. L'Agron. Trop. , vol. XXVII, 905-929.

CHAVES (J.C.D.), PAYANT (M.A.), CALEGARI (A.), 1997. - Input of dry matter and nutrients to the soil from cover plants cultivated between rows of perennial crops and their effects on soil reaction. Instituto Agronomico do Parana. Arquivos de Biologia e Tecnologia. 1997, 40 : 1, 47-55.

CHENEBY (D.), NICOLARDOT (B.), GODDEN (B.), PENNINGCKX (M.), 1994.
- Biological Agriculture and Horticulture, 10 : 255-264.

CHRISTENSEN (B. T.), 1992. - Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In : " Advances in Soil Science". 20 : 1-90.

COULTAS (C.L.), POST (T.J.), JONES (J.B.), HSIEH (Y.P.), 1996. - Use of velvet bean to improve soil fertility and weed control in corn production in Northern Belize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27 : 9-10, 2171-2196.

COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS (CPCS) , 1967. - Classification des sols. Edition 1967, 87 p. , multigr.

DABIN (B.), 1956. - Contribution à l'étude la fertilité des terres de barre, *Agron. trop.*, 11(4) : 490-506.

DALAL (R.C.), MAYER (R.J.) 1987. - Long-term Trends in Fertility of soils under Continuous Cultivation and Cereal Cropping in Southern Queensland. V Rate of Loss of Total Nitrogen from the Soil Profile and Changes in Carbon : Nitrogen Ratios. *Aust. J. Soil Res.*, 37, 493-504.

DEANS (J.R.), MOLINA (J.A.E.), CLAPP (C.E.), 1986. - Models for predicting potentially mineralizable nitrogen and decomposition rate constante. *Soil Sci. Soc. Am J.* 50 (2) : 323-326.

DECAU (J.), PUJOL (B.), BOUSQUET (P.), DEBAEKE (P.), 1994. - Systèmes de culture et dynamique de l'azote du sol. Présence et formes de l'azote minéral après les récoltes. Vol. 80. n°1 pp. 91-101.

DESJARDINS (T.), ANDREUX (F.), VOLKOFF (B.), CERRI (C.), 1994. - Organic carbon and ¹³C contents in soils and soil fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma*, 61 : 19-25.

DJEGUI (N.), 1992. - Matière organique et azote dans les sols cultivés sur terres de barre (Bénin). Thèse de doctorat ENSA Toulouse, 190 p.

EDWARDS (A. P.), BREMNER (J. M.), 1967. - Dispersion of soil particles by sonic vibration. *Soil Sci. J.*, 18 : 47-63.

FAO-UNESCO, 1989. -Carte mondiale des sols. Légende révisée. Rapport sur les ressources en sol du monde n°60, FAO (Rome), 125p.

FAUCK (R.), MOUREAUX (Cl.), THOMANN (Ch.), 1969. - Bilan de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. Agron. Trop. ,3, 263-301.

FAUCK (R.), 1972. - Les sols rouges sur sables et grès d'Afrique Occidentale. Mém. ORSTOM (Paris) n° 61, 257 p.

FELLER (C.), CHOPART (J.L.), DANCETTE (F.), 1987. - Effet de divers modes de restitutions de pailles de mil sur le niveau et la nature du stock organique dans deux sols sableux tropicaux (Sénégal). Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 23, 237-252.

FELLER (C.), BURTIN (G.), GERARD (B.), BALESSENT (J.), 1991a. - Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêts et limites. Science du sol, 29 : 77-93.

FELLER (C.), FRITSCH (E.), POSS (R.), VALENTIN (C.), 1991b. - Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest en particulier). Cah. ORSTOM. ; Sér. Pédol., 26 : 25-36.

FELLER (C.), CASABIANCA (H.), CERRI (C.), 1991c. - Renouvellement du carbone des fractions granulométriques d'un sol ferrallitique forestier (Brésil) is en culture de canne à sucre. Etude par le ¹³C en abondance naturelle. Cah. ORSTOM., Sér. Pédol., 26 : 365-369.

FELLER (C.), 1993. - La matière organique du sol et la recherche d'indicateurs de la durabilité des systèmes de culture dans les régions tropicales semi-arides et subhumides d'Afrique de l'Ouest. Dans Proceedings of the scope workshop : Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions. GANRY F. CAMBELL B. (Eds.). 15-19 novembre 1993, Dakar. Sénégal.

- FELLER (C.), LAVELLE (P.), ALBRECHT (A.), NICOLARDOT (B.), 1993.** - La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux. Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion. Dans la jachère en Afrique de l'Ouest p. 15-32. FLORET C. ORSTOM, Paris.
- FELLER (C.), 1995.** - La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1 : 1 : recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. ORSTOM, Collection TDM393 pages + annexes.
- FELLER (C.), BEARE (M.H.), 1997.** Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79 : 69-116.
- FELLER (C.), 1999.** - Organo-mineral interactions in tropical soils. In search of "functional" organic matter pools : the particle-size fractionation approach. III Encontro Brasileiro Sobre Substâncias Húmicas 24-26 1999. Universidade Federal de Santa Maria, pp. 104-124.
- FLORES (M.), 1987.** - El uso del frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*) por agricultores de la costa norte de Honduras para la producción de maíz. CIDICCO, Tegucigalpa, Honduras.
- FRANCOIS (C.), 1988.** - Devenir à court terme de différentes formes d'azote (urée, végétaux et sol) dans un ferrisol (Martinique). Caractérisation de N-organique par fractionnement granulométrique. Etude avec ^{15}N . Thèse Doct., Univ. Nancy I, 135p + Annexes.
- FRISSEL (M.J.), 1978.** - Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystem. Elsevier, 356 p.
- GANRY (F.), BERTHEAU (Y.), 1982.** - Gestion des résidus de récolte et économie de l'azote au Sénégal. In Le recyclage des résidus agricoles organiques en Afrique (C.R. Coll. FAO/SIDA Lomé 1980). FAO. Soil Bull. 47, 37-54.

- GANRY (F.), GUIRAUD (G.), 1979.** - Mode d'application du fumier et bilan azoté dans un système mil-sol sableux du Sénégal. IAEA-SM-235/16, p. 313-331.
- GANRY (F.), 1990.** - Application de la méthode isotopique à l'étude de bilans azoté en zone tropicale sèche. Th. Université Nancy I, 355 p.
- GAVINELLI (E.), FELLER (C.), LARRE-LARROUY (M. C.), BACYE (B.), DJEGUI (N.) NZILA (J. de D.), 1995.** - A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation : examples for tropical soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 26 (11-12), 1749-1760.
- GEIGER (S.C.) , MANU (A.), BATIONO (A.), 1992.** - Changes in a Sandy Soil Following Crop Residue and fertilizer additions. Soil Sci. Soc. Am. J. , vol. 56, 172-177.
- GIGOU (J.), 1983.** - La mobilisation des éléments minéraux par le sorgho " IRAT 55" au cours de deux saisons aux pluviométries très différentes. Agron. Trop. , 39(4) : 324-334.
- GIGOU (J.), CHABALIER (P.F.), 1987.** - L'utilisation de l'engrais azoté par les cultures annuelles en Côte-d'Yvoire. Agron. Trop. , 43(3) : 171-179.
- GILLIER (P.), 1966.** - Les exportations en éléments minéraux d'une culture d'arachide dans les différentes zones du Sénégal : oléagineux, Revue internationale des corps gras, 19ème année n°16.
- GREENLAND (D.J.), 1962.** - Journal Agric. Sc. (Camb.) : 58, 227 p.
- HAMADINA (M.K.), 1996.** - L'effet de cultures de couverture précises et du paillis de *Dactyladenia barteri* sur un Ultisol dans les tropiques humides. M.Sc. Université des Sciences et Technologies de l'Etat de Rivers, Nigeria.
- HANWAY (J.J.), 1962.** - Corn growth and composition in relation to soil fertility. I. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield II. Uptake

of N,P,K and their distribution in different plant parts during the growing season. III. Percentage of N,P,K in different plant parts in relation to stage of growth. Agron. J., 54. I : 145- 148. II : 217-222. III : 222-229.

HINDS A. A.), LOWE (L. E.), 1980. - Distribution of carbon, nitrogen, sulfur and phosphorus in particle size - separates from gleysolic soils. Can. J. Soil Sci., 60 : 783-786.

IRAT, 1975. - Les recherches en agronomie à l'ORSTOM de 1969 à 1974. Agron. Trop. 30, 2 : 148-153.

JACQUINOT (L.), 1964. - Contribution à l'étude de la nutrition minérale du sorgho Congossane. Agron. Trop. , 19(8-9) : 669-722.

JOHNSON, 1968. - Notes sur la fertilité chimique des Terres de Barre du sud Dahomey. Rapp. multigr. 15p.

KOTHANDARAMAN (R.), JACOB (M.), KRISHNAKUMAR (M.R.), 1989. - Efficacité comparée de *Mucuna bracteata* et de *Pueraria phaseoloides* sur l'enrichissement du sol et la population microbienne. Indian Journal of Natural Rubber. India Kottayam 686-709 ; 2 n°2 : 147-150.

LADD (J.N.), AMATO (M.), OADES (J.M.), 1985. - Decomposition of plant material in Australian Soils. III. Residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume material and soil organic matter, decomposing under field conditions. Aust. J. Soil Res., 23, 603-611.

LAL (R.), WILSON (G.F.), OKIGBO (B.N.), 1978. - No till farming after various grasses and leguminous crop covers in tropical Alfisol. I. Crop performance. Field Crops research, 1 : 71-84.

LAL (R.), 1996. - Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. I : Soil physical and hydrological properties. II : Soil chemical properties. *Land-Degradation-and-Development*, 7(1) : 19-45.

LAL (R.), 1997. - Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical alfisol in western Nigeria. I. Crop yield and soil physical properties. *Land Degradation Rehabil.* 42 : 145-160.

LAVELLE (P.), MELENDEZ (G.), PASHANASI (B.), SCHAEFER (R.), 1992. -Nitrogen mineralization and reorganization in casts of the geophagous tropical earthworm. *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae). *Biol. Fertil. Soils* (1992) 14 : 49-53.

LAMOUREUX (M.), 1957. - Reconnaissance de quelques sols alluviaux du Mono, en bordure du plateau de Terre de Barre ORSTOM-Cotonou- Dahomey- 9p.

LEGER-CRESSON (N.), 1989. - Introduction d'une légumineuse fourragère, (*Mucuna aterrima* Holl.) dans la culture du maïs pluvial à Colima (Mexique). Thèse Doct. Biol. et Physiol. vég. Univ. Montpellier II, 100p + annexes.

LESAIN (S.), 1998. - Effet d'une légumineuse de couverture (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) sur le stock organique d'un sol ferrallitique (Bénin) cultivé en maïs. Etude avec le ¹³C en abondance naturelle. DEA National de Science du sol. INA- Paris-Grignon, ENSA-Montpellier. ENSA-Rennes. LCSC-ORSTOM. 20p.

LHERITEAU (F.), 1996. - Influence de couverture de Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) et lotier (*Lotus uliginosus*) sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des andosols. Rapport, Montpellier, France, CIRAD. 51p. sans annexes.

LOUE (A.), 1980. - Le potassium et le maïs. Dossier K₂O n°16, SCPA Mulhouse, 48p.

MANDIMBA (G.R.), WEST (N.E.), 1996. -Performance of *Mucuna pruriens* as biofertilizer on the growth of soybean and maize crops in the Congo. *Proceedings of the Fifth*

International Rangeland Congress, Salt Lake City, Utah, USA, 23-28 july, 1995.
I : 340-341.

MARY (B.), REMY (J.C.), 1979. - Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture. I : Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée. Ann. Agron., 30 (6), 513-527.

MILLETTE (G.), COFFI (O.), SANTANNA (R.), VIEIFFON (J.), 1965. - I : Contribution aux études pour la mise en valeur des régions sud et nord Togo. - - II : Les sols de la région maritime et de la région des savanes Togo. FAO (Rome) - études pédo- hydrologiques Vol.1 Sud TOGO. ORSTOM(Paris). I : 93p. II : 189p

MOLINA (J.A.E.), CLAPP (C.E.), LARSON (W.E.), 1980. - Potentially mineralizable nitrogen in soil : The simple exponential model does not apply for the 12 weeks of incubation. Soil Sci. Soc. Am J., 44 : 442-444.

N'DIAYE (J.P.), 1978. - Enquête fertilité en milieu paysan dans la région du Siné Saloun. Document ISRA non publié. Sénégal 15p. + annexes.

OSEI-BONSU (P.), BUCKLES (D.), SOZA (F.R.), ASIBUO (J.Y.), 1995. - Traditional food uses of *Mucuna pruriens* and *Canavalia ensiformis* in Ghana Internal Document CIMMYT, Mexico, Mexique et Crops Research Institute, Ghana.

OUATTARA (B.), SERPANTIE (G.), OUATTARA (K.), HIEN (V.), LOMPO (T), BILGO (A.), 1996. - Etats physico-chimiques des sols cultivables en zone cotonnière du Burkina Faso. Effets de l'histoire culturelle et du type de milieu. Atelier, 02-04 octobre 1997, Bamako, Mali. Doc. ORSTOM, Dakar (SEN), p. 17-32 multigr.,bibl., graph.

PHILLIPS (P.E.), PHILLIPS (S.H.). (Eds), 1984. - No tillage agriculture principles and practices. New York. Etats-Unis, Van Nostrand Reinold Company Inc.

PICHOT (J.), 1974. - Rôle de la matière organique dans la fertilité du sol. *Agron. Trop.* , 30(2), 170-175.

PIERI (C.), 1985. - Fertilisation des cultures vivrières et fertilité des sols en agriculture paysanne sub-saharienne. L'expérience de l'IRAT. in : "Technologies Appropriées pour les paysans des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest." Université de Perdue, 85-126.

PIERI (C.), OLIVER (R.), 1986. - Assesment of K losses in tropical cropping systems of francophone Africa and Madagascar. Nutrient balances and need for potassium. C.R. 13ème coll. Inst. Int. Potasse, Reims (France), IPI (Suisse) edt. pp. 73-92.

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. IRAT/CIRAD, 444 p.

POSS (R.), 1991. - Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les Terres de Barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse doct. , Un. Paris VI, 335 p.

RATYALAKSHMI (P.), GEERVANI (P.), 1995. - Nutritive value of the foods cultivated and consumed by the tribals of South India. *Plant Foods for Human Nutrition* ; 46(1) : 53-61.

REDSHAW (M.J.), 1982. - Leguminous cover crops, the key to sustained agriculture on upland soils in Indonesia. *Indonesian Agricultural Research and Development Journal*, 4(4) : 117-123.

ROOSE (E.J.), 1970. - Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogenèse d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM*, Sér. Pédol. 8(4) : 469-482.

ROOSE (E.), 1981. - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. *Travaux et Documents de l'ORSTOM n°130*, 566 p.

SANCHEZ (P.A.), 1976. - Properties and management of soils in the tropics. John Wiley and Sons. 68 p.

SANCHEZ (P.A.), GICHURU (M.P.), KATZ (L.B.), 1982. - Organic matter in major soils of Tropical and Temperate regions. In : Non-Symbiotic Nitrogen Fixation and organic matter in the Tropics. Trans 12 th. Internat. Congr. Soil Sci. (New-Delhi 8-16 Fevr. 1982) p : 99-114.

SANGINGA (N.), IBEWIRO (B.), HOUNGNANDAN (P.) VANLAUWE (B.) OKOGUN (J.A.), AKOBUNDUN (I.O.), VERSTEEG (M.), 1996. - Evaluation of symbiotic properties and nitrogen contribution of *Mucuna* to maize grown in the derived savana of West Africa. Plant and Soil. 179(1) : 119-129.

SARAGONI (H.), POSS (R.), 1991. - Les prélèvements minéraux des variétés de maïs cultivées au Togo méridional. Soumis à publication à Agron. Trop.

SEBILLOTTE (M.), 1991. - La jachère en Afrique de l'Ouest. Atelier international. Montpellier du 2-5/12/1991. Edt. ORSTOM collection. COLLOQUES et SEMINAIRES Paris 1993.

SEDOGO (M.P.), 1981. - Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sols ferrugineux et sous climat tropical semi-arid : "Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures." Thèse de doct. Ingénieur, Institut Polytechnique de Lorraine, Nancy, 195p.

SIBAND (P.), 1972. - Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute Casamance, Principaux résultats. L'Agron. Trop. vol. XXVII, n°5, 574-590.

SIBAND (P.), 1974. - Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol d'un sol rouge de Casamance. Agron. Trop. , 29(12), 1228-1248.

- SIBAND (P.), 1981.** - Croissance, nutrition et production du mil (*Pennisetum typhoides*) (Hubbard et stapf). Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. Thèse d'Etat Univ. Sc. Techn. Languedoc (Montpellier), 302p.
- SLANSKY (M.), 1959.** - Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo Thèse Un. Nancy.
- STANFORD (G.) , SMITH (S.J.), 1972.** - Nitrogen mineralization potentials of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36 : 465-472.
- STANFORD (G.), EPSTEIN (E.), 1994.** - Nitrogen mineralization - water relation in soils. Soil Sc. Am J., 38 : 103-106.
- STAT-ITCF, 1989.** - Manuel d'utilisation ITCF version française
- SULCE (S.), 1993.** - Study of mineralization potential and the fate of mineral nitrogen fertilizers in the cultivated soils of the myzeque region (Albania). Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Lorraine 110p.
- TABATABAL (M.A.), AL-KHAFAJI (A.A.), 1989.** - Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. Soil Sci. Am J. 44 : 1000-1006.
- THURSTON (H.D.), SMITH (M.), ABAWI (G.), KEARL (S.), (Eds), 1994.** - "Tapado" Slash/mulch : how farmers use it and what researchers know about it. Ithaca, New York, Etas-Unis, CATIE et CIFAD, 302p.
- TRAN VIN (A.), AKOMIA (C.), 1978.** - Evaluation de la fertilité des sols sous palmeraie (station de Pobè). Rap. mult. non publié. Etude n°158 CENAP Cotonou Bénin.
- TRIOMPHE (B.L.), 1996.** - Seasonal nitrogen dynamics and long term changes in soil properties under the Mucuna-maïs cropping system on the hillsides of northern Honduras. Thèse doct. , Cornell. University, Ithaca, New York, Etas-Unis, 217p.

TROUVE (C.), MARIOTTI (A.), SCHWARTZ (D.), GUILLET (B.), 1991. - Etude par le traçage naturel en ^{13}C de la dynamique de renouvellement des matières organiques des sols de savane après plantation de pins et d'Eucalyptus au Congo. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 26 : 357-364.

VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), 1967. - Etude de l'érosion sur Terre de Barre. Erosion sous culture de maïs : maïs avec fumure minérale.

VOLKOFF (B.), 1970. - Carte pédologique de reconnaissance du Dahomey à 1/200.000. Feuille PORTO-NOVO (Sédimentaire Sud). ORSTOM Paris, Rapp. multigr. 1vol. 82p. Multigr. + Table + Carte dépl.

VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.), 1976. - Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin au 1/200.000. Feuille de Porto-Novo Notice explicative n°66(1), ORSTOM (Paris), 39p. , 1carte h.t.

VOLKOFF (B.), 1976. - Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin au 1/200.000. Feuille d'Abomey. Notice explicative n°66(2), ORSTOM (Paris), 40p. , 1carte h.t.

VONG (P.C.), BOUCHAMA (J.), JACQUIN (F.), 1989. - Contribution à l'étude du potentiel de minéralisation de l'azote en sols cultivés lorrains. Science du sol, 27 (3) : 215-226.

WALKLEY (A.), BLACK (I.), 1934. - An examination of the degt-jareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci., 37 : 29-38.

WANEUKEM (V.), GANRY (F.), 1991. - Test de diagnostic de la fertilité azotée d'un sol tropical. Essai de validation in situ d'un indicateur chimique du sol. Rapp multigr, IRAT/CIRAD, Montpellier, 39p. + annexes.

WANEUKEM (V.), GANRY (F.), 1992. - Relation entre les formes d'azote organique du sol et l'azote absorbé par la plante dans un sol ferrallitique du Sénégal. Cah. ORSTOM Sér. Pédol., 27 (1), 97-107.

WANEUKEM (V.), 1995. - Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. Cas des sols cultivés en maïs de la zone Sud-Soudanienne du Burkina-Faso. Thèse de doct. ENSA Montpellier 164p.

WERTZ (R.), 1979. - Dossier pour une synthèse des résultats de la recherche agronomique au Bénin en maïsiculture. Rapp. IRAT/CIRAD (Cotonou), 241p. , multigr.

WETSELAAR (R.), GANRY (F.), 1982. - Nitrogen balance in tropical agrosystems. Microbiology of tropical soils and plant productivity, Y.R. Dommergues and H.G. DIEM Edit., the Hague, Nijhoff-Junk publ., 328 p.

WILSON (G.), LAL (R.), OKIGBO (B.N.), 1982. - No tillage farming after various grasses and leguminous crop covers in tropical Alfisol. I. Crop performance, Field Crops Research, 1 : 71-84.

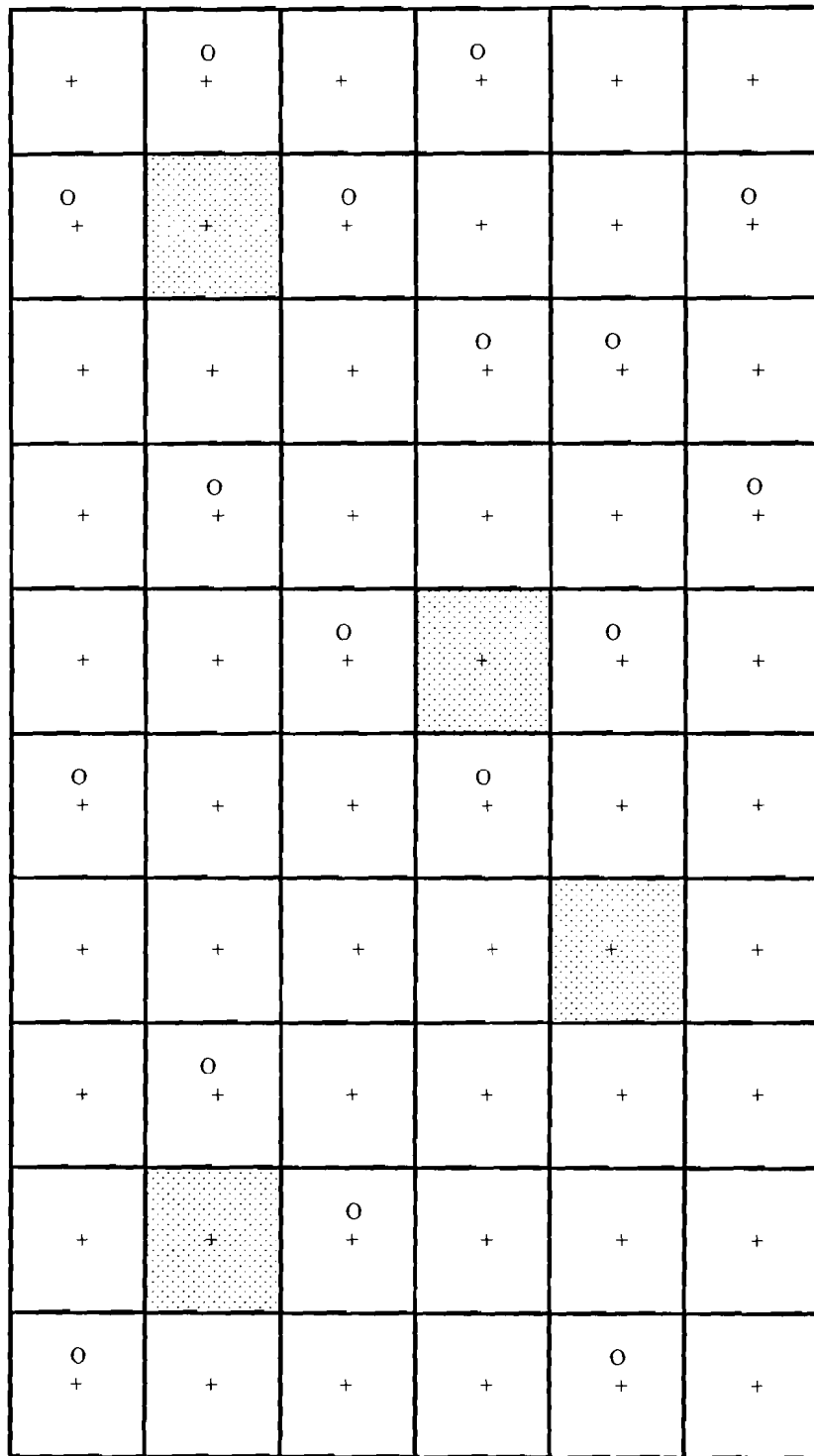
WOOMER (P.L.), SWIFT (M.J.), 1994. The biological management of tropical soil fertility John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chicester, Royaume-Uni, 243 p.

ANNEXES

ANNEXES

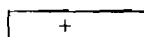
II - IV

Annexe II.1 : Plan d'échantillonnage des parcelles



LEGENDE :

Zones de prélèvement



C, N, N minéral



Plantes : maïs et Mucuna



Densité apparente, pF et humidité

ECHELLE :

3 m

1,33 m

Annexe III.1

MS totale (kg ha⁻¹) restituée au sol par les traitements de 1994 à 1995.

(Valeurs moyennes avec écart-type de la moyenne)

Plantes	Organes	M1	M2a	M2b	NPK	T
Maïs	PA	10510 ± 440	6140 ± 320	8442 ± 560	9260 ± 250	970 ± 40
	PR	2180 ± 120	2100 ± 150	2887 ± 185	2180 ± 110	280 ± 20
	Total	12690 ± 450	8240 ± 325	11329 ± 560	11440 ± 260	1250 ± 40
Mucuna	PA	10890 ± 630	10890 ± 720 1 an sur 2	-	-	-
	PR	2450 ± 280	2450 ± 160 1 an sur 2	-	-	-
	Total	13340 ± 635	13340 ± 725	-	-	-
Maïs et Mucuna	MS totale (PA+PR)	26030 ± 1200	21580 ± 1208	11329 ± 560	11440 ± 260	1250 ± 40

MS : matière sèche PR : parties racinaires PA : parties aériennes

Annexe IV.1 : caractéristiques physiques des sols dans les couches 0-10, 10-20 et 20-40 cm selon les traitements
Année 1995

Traitements	Profondeurs	A + L		pF4,2		pF2,5		Humidité %		Da	
		Moy.	c.v.%	Moy.	c.v.%	Moy.	c.v.%	Moy.	c.v.%	Moy.	c.v.%
M1	0-10 cm	15,45	7,8	5,9	15,9	8,5	7,4	8,6	15,8	1,35	21,9
	10-20 cm	17,05	8,6	6,1	19,8	7,9	11,5	8,2	21,5	1,45	24,8
	20-40 cm	25,8	12,3	6,2	18,7	9,8	9,3	12,9	25,6	1,56	26,7
M2	0-10 cm	18,71	13,6	5,4	8,9	7,5	8,1	7,5	23,4	1,43	13,6
	10-20 cm	17,26	9,4	5,7	15,3	7,6	6,9	8,4	20,6	1,54	18,5
	20-40 cm	36,63	11,8	7,6	20,2	10,7	13,4	13,5	17,3	1,53	20,9
NPK	0-10 cm	12,1	6,2	6,8	7,2	8,5	10,7	7,8	24,8	1,39	31,3
	10-20 cm	13,0	9,3	7,0	13,4	9,5	8,6	9,0	22,4	1,53	25,1
	20-40 cm	23,4	14,6	10,5	17,9	13,0	12,3	12,6	18,1	1,55	28,6
T	0-10 cm	15,28	3,9	4,5	5,8	6,9	6,7	4,5	10,6	1,42	16,6
	10-20 cm	20,69	9,7	4,7	11,6	6,5	9,8	7,5	13,7	1,33	19,0
	20-40 cm	32,92	12,7	6,6	13,3	9,4	13,6	12,0	19,2	1,48	22,4

Annexe IV.2 : caractéristiques chimiques des sols (couches 0-10, 10-20 et 20-40 cm) selon les traitements

Traitements	Profondeurs	C (g kg ⁻¹ sol)				N (g kg ⁻¹ sol)				S (cmol kg ⁻¹)				CEC (cmol kg ⁻¹)				pH			
		88		96		88		96		88		96		88		96		88	96		
		Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	
M1	0-10 cm	5,5	3,6	12,3	9,7	0,45	4,4	1,0	7,0	1,37	3,6	2,35	5,1	3,61	5,5	5,2	3,5	5,2	1,9	5,0	2,0
	10-20 cm	3,9	5,1	7,2	6,9	0,34	4,4	0,62	6,4	1,23	4,1	2,14	4,7	3,23	4,6	4,8	4,4	5,1	3,9	5,0	3,2
	20-40 cm	3,5	4,6	5,9	6,8	0,3	5,0	0,58	6,9	1,19	4,2	1,85	4,9	2,75	5,1	4,2	4,8	4,9	4,5	4,8	3,3
M2	0-10 cm	5,5	3,6	6,7	3,0	0,46	10,9	0,6	8,3	1,21	4,9	1,51	4,6	3,55	7,3	4,1	2,6	5,3	1,9	5,2	1,9
	10-20 cm	4,4	4,5	5,0	4,0	0,38	4,7	0,46	6,5	1,06	4,7	1,42	4,9	3,12	5,8	3,7	3,7	5,3	3,8	5,0	3,2
	20-40 cm	3,8	3,9	3,9	3,8	0,32	5,6	0,43	7,0	0,83	4,8	1,2	5,0	2,6	5,8	3,3	4,2	5,1	3,9	4,8	3,5
NPK	0-10 cm	5,8	3,4	6,5	3,1	0,51	4,0	0,55	8,3	1,2	3,3	1,34	3,0	3,46	5,8	3,5	5,7	5,6	1,8	5,1	2,0
	10-20 cm	4,6	4,3	5,0	4,0	0,37	5,4	0,44	6,8	1,05	3,8	1,18	3,8	3,0	5,0	3,2	4,7	5,4	3,7	4,9	3,3
	20-40 cm	3,8	4,5	4,0	3,5	0,3	5,7	0,38	7,4	0,85	3,5	1,06	4,2	2,05	4,9	2,6	4,9	5,3	3,8	4,8	3,4
T	0-10 cm	6,5	6,1	3,9	5,4	0,54	6,0	0,30	3,3	1,49	4,0	1,09	2,7	3,8	5,3	2,9	6,9	5,6	1,8	4,8	2,1
	10-20 cm	5,6	6,4	3,2	5,0	0,45	5,1	0,30	5,0	1,21	4,1	0,86	3,5	3,14	4,8	2,2	6,8	5,4	3,3	4,1	3,6
	20-40 cm	4,9	6,9	2,8	5,0	0,36	5,0	0,25	5,6	1,12	4,0	0,7	3,7	2,8	5,7	2,1	6,7	5,1	3,5	3,9	4,0

**Annexe IV.3 : Variation des stocks et teneurs en éléments organiques et minéraux des
sols selon les traitements de 1988 à 1996.**

Traitements	Profondeur s	ΔC		ΔN		Δ Bases éch.		Δ CEC		Δ pHeau	
		t ha ⁻¹	Moy. c.v.%	t ha ⁻¹	Moy. c.v.%	cmol kg ⁻¹	Moy. c.v.%	cmol kg ⁻¹	Moy. c.v.%	Moy. c.v.%	
M1	0-10 cm	9,20	4,6	0,60	5,5	0,98	5,2	1,59	5,2	-0,2	2,0
	10-20 cm	4,70	5,2	0,4	5,2	0,91	4,5	1,57	3,9	-0,1	3,1
	20-40 cm	3,70	5,6	0,4	6,0	0,66	4,7	1,45	4,6	-0,1	3,4
M2	0-10 cm	1,70	4,0	0,20	9,4	0,30	4,8	0,60	5,0	-0,1	2,0
	10-20 cm	0,90	5,1	0,10	5,6	0,36	5,1	0,65	4,9	-0,3	3,1
	20-40 cm	0,10	4,3	0,16	6,4	0,37	4,9	0,70	4,6	-0,3	3,4
NPK	0-10 cm	1,0	4,1	0,05	6,3	0,14	3,5	0,20	5,8	-0,5	1,9
	10-20 cm	0,6	4,3	0,11	6,0	0,13	3,9	0,21	4,4	-0,5	3,2
	20-40 cm	0,3	4,8	0,11	6,7	0,21	3,8	0,60	5,0	-0,5	3,1
T	0-10 cm	-3,00	6,2	-0,27	5,1	-0,40	3,7	-0,90	6,3	-0,8	2,1
	10-20 cm	-3,10	6,4	-0,21	5,3	-0,35	3,5	-0,94	5,7	-1,3	3,4
	20-40 cm	-3,80	7,2	-0,14	5,8	-0,42	3,8	-0,70	6,5	-1,2	3,6

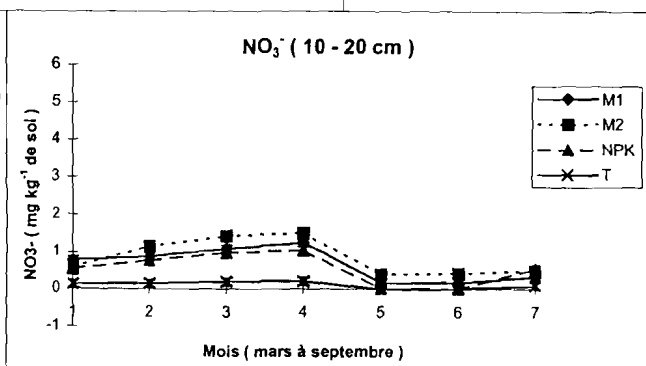
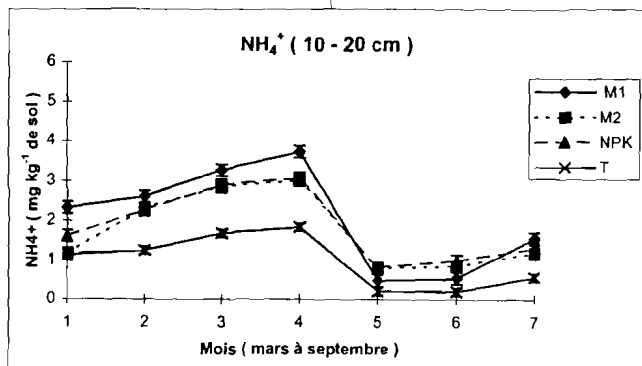
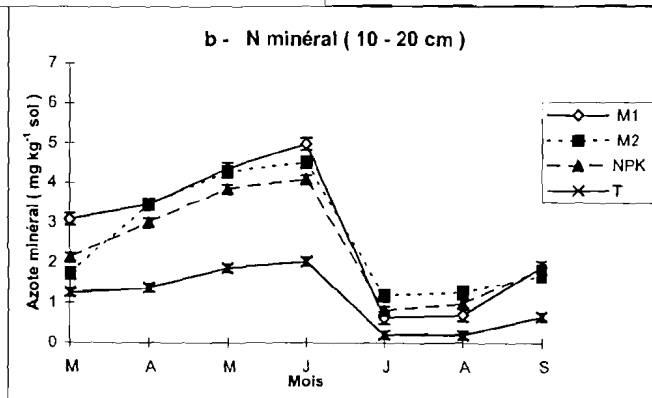
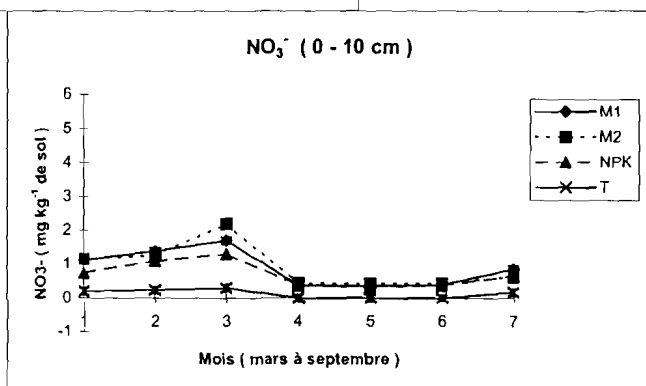
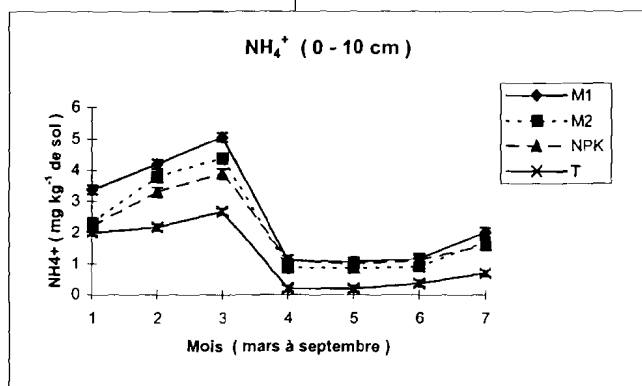
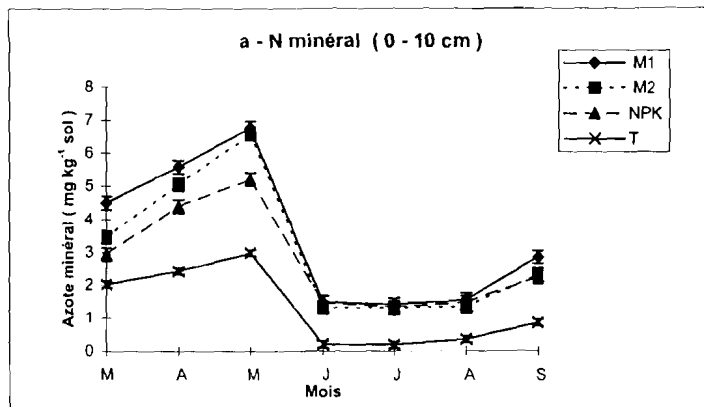
$$\Delta(C, N, pH...) = (C, N, pH...)1996 - (C, N, pH...)1988$$

ANNEXES

VI

Annexe VI.1 a et b : Variation saisonnière des taux d'azote minéral dans le sol sous les différents traitements; année 1995, profondeurs : a) 0-10 cm, b) 10-20 cm

n = 36



Annexe VI.1c : Variation saisonnière des taux d'azote minéral dans les sols sous les différents traitements
 année 1995
 c- profondeur 20-40 cm

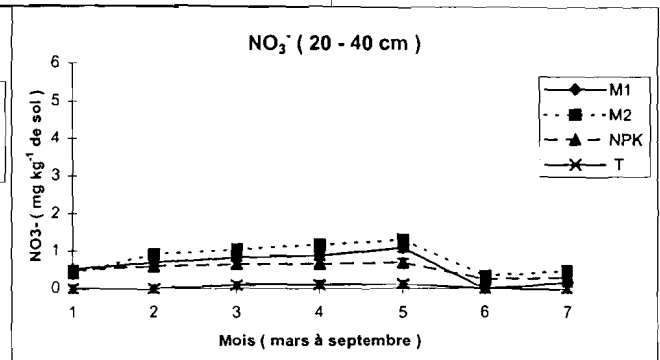
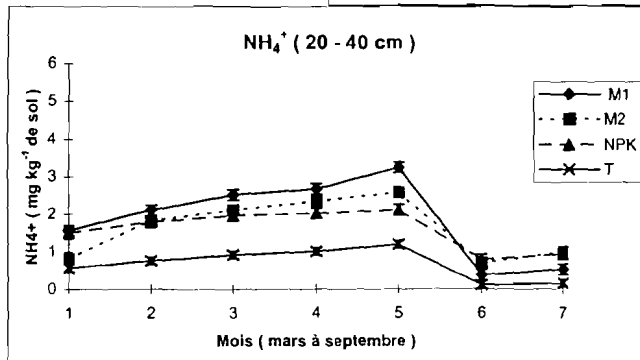
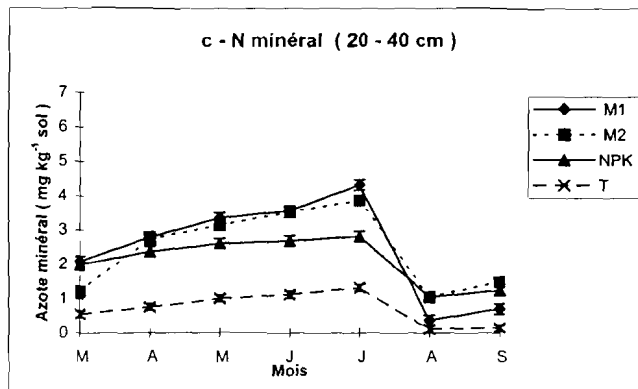
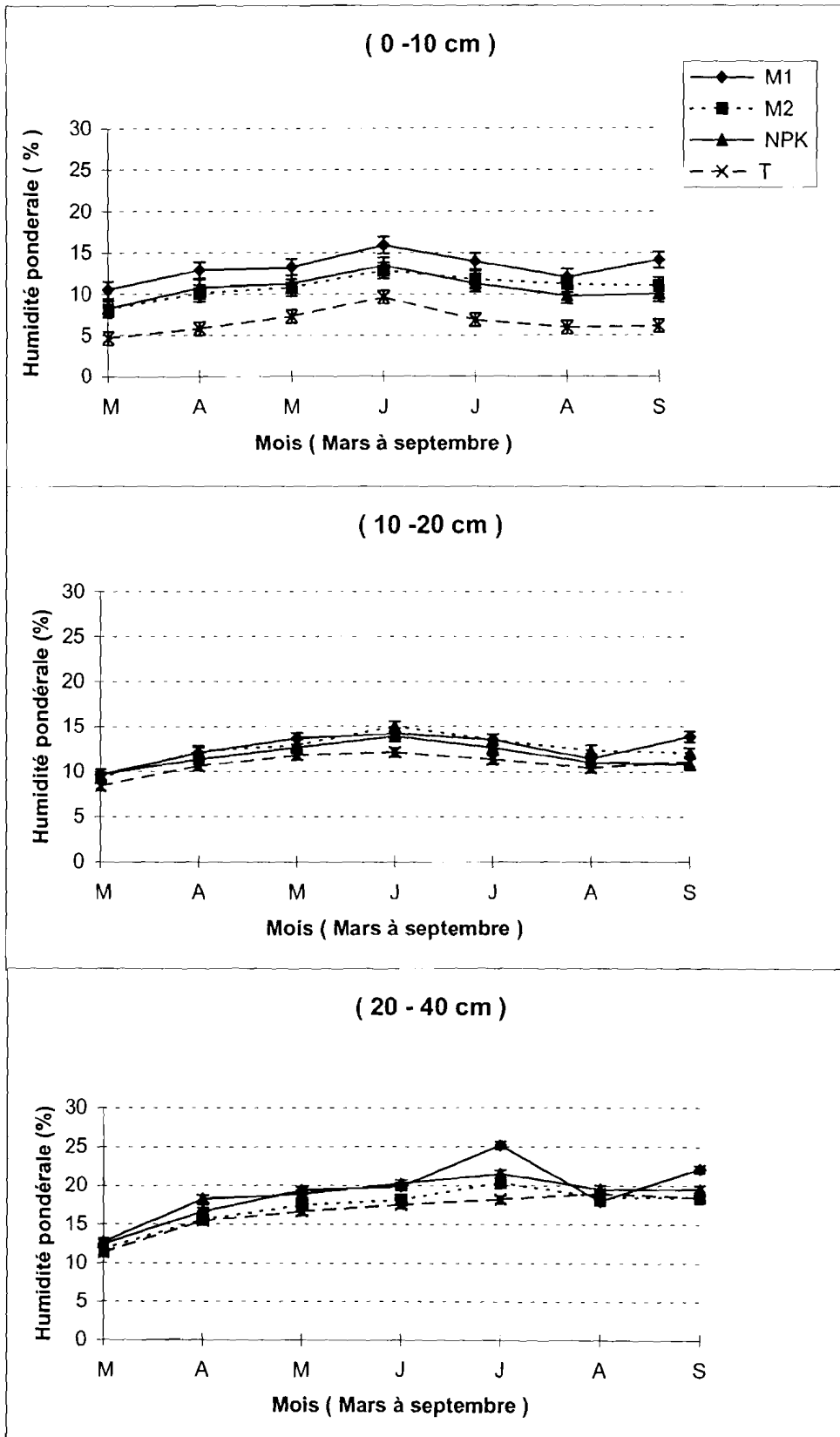


Figure VI.1d : Variation saisonnière de l'humidité du sol au cours de la saison de 1995 selon les traitements.

n = 17



Annexe VI.2 : Azote minéralisé cumulé (mg kg⁻¹ de sol) avec le flush selon les traitements dans les couches 0-10 et 10-20 cm.
Année 1995

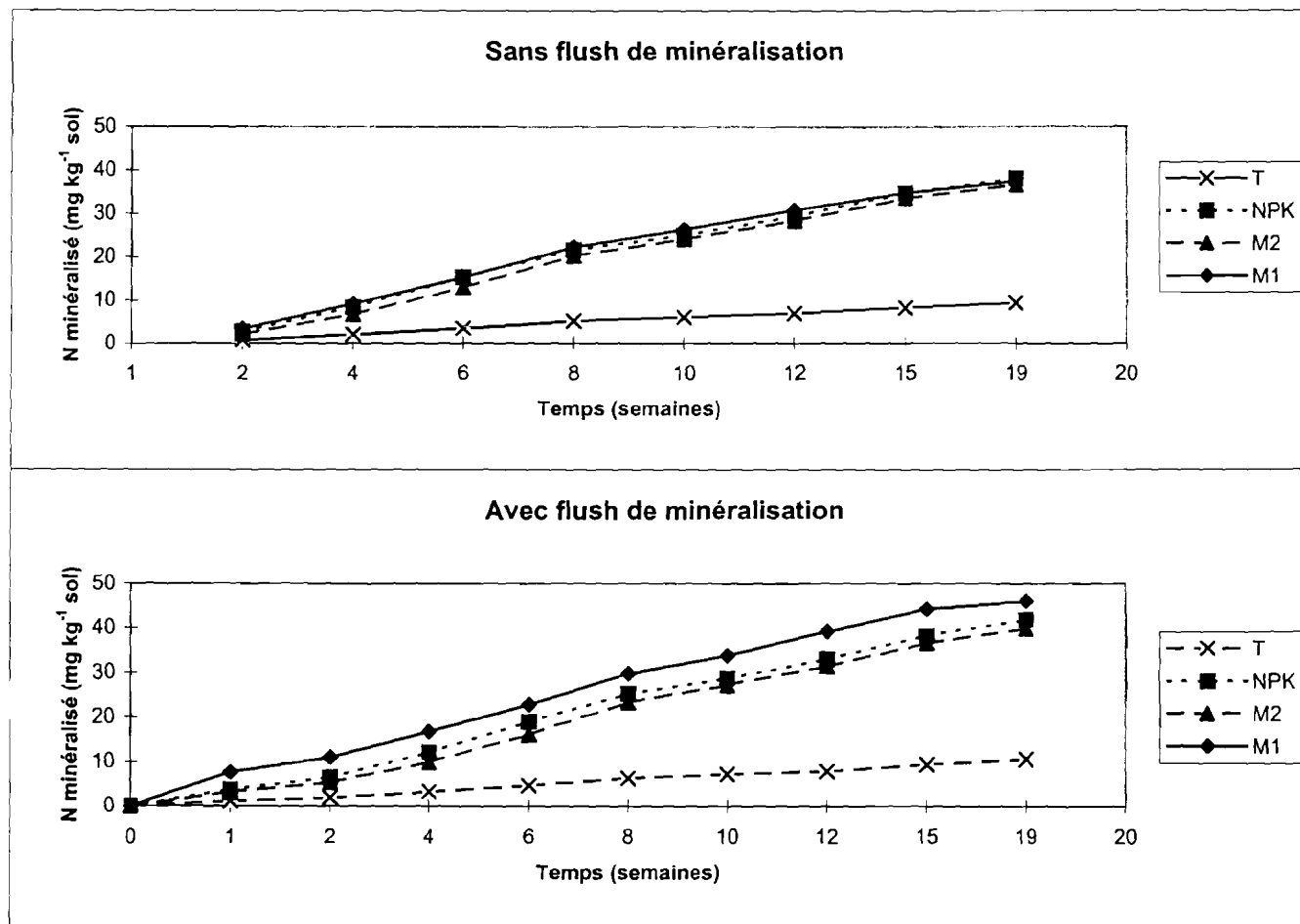
n = 3

Teneurs N (mg kg ⁻¹ sol).traitement ⁻¹																
0-10 cm																
Temps	T				NPK				M2				M1			
semaines	N.NH4	N.NO3	N.min.	Et.	N.NH4	N.NO3	N.min.	Et.	N.NH4	N.NO3	N.min.	Et.	N.NH4	N.NO3	N.min.	Et.
mg kg ⁻¹ sol																
0	2,95	0,22	3,17	0,25	4,72	1,65	6,37	0,04	2,51	3,36	5,87	0,49	3,51	1,04	4,55	0,17
1	0,34	0,77	1,11	0,12	0,29	2,78	3,07	0,08	0,07	3,07	3,14	0,44	2,16	5,40	7,56	1,21
2	0,41	1,47	1,88	0,16	0,38	5,40	5,78	0,05	0,09	5,21	5,30	0,59	2,23	8,71	10,94	1,27
4	0,44	2,77	3,21	0,39	0,51	10,93	11,44	0,67	0,13	9,75	9,88	1,44	2,30	14,41	16,71	1,18
6	0,53	4,09	4,62	0,42	0,59	17,74	18,33	0,95	0,16	15,89	16,05	1,43	2,38	20,37	22,75	0,87
8	0,67	5,65	6,32	0,51	0,78	23,82	24,59	1,25	0,29	23,03	23,32	1,37	2,54	27,19	29,73	0,36
10	0,68	6,47	7,15	0,54	0,82	27,19	28,01	1,26	0,30	26,91	27,21	1,11	2,56	31,23	33,79	0,93
12	0,72	7,15	7,88	0,55	0,86	30,52	31,38	1,27	0,34	30,07	30,41	0,94	2,61	34,62	37,24	1,78
15	0,75	8,59	9,35	0,50	0,88	36,78	37,66	1,80	0,36	36,17	36,53	0,98	2,64	39,63	42,27	2,07
19	0,76	9,72	10,48	0,55	0,89	41,30	42,19	1,82	0,39	40,40	40,79	1,08	2,64	43,34	45,98	1,84
10-20 cm																
0	4,77	0,19	4,96	0,37	4,17	1,25	5,42	0,24	2,06	3,15	5,21	0,20	4,21	0,90	5,10	0,41
1	2,38	0,24	2,62	0,30	1,89	2,13	4,03	0,85	0,14	3,28	3,43	0,84	7,03	1,32	8,35	0,26
2	3,27	0,64	3,91	0,18	1,96	3,90	5,87	1,09	0,18	4,87	5,05	0,91	10,23	3,65	13,88	0,36
4	3,50	1,74	5,24	0,21	2,06	8,06	10,12	1,41	0,22	8,43	8,64	0,86	10,42	7,60	18,02	1,81
6	3,58	2,87	6,45	0,33	2,11	12,32	14,43	1,66	0,26	12,37	12,63	0,82	10,59	11,99	22,59	2,24
8	3,71	4,17	7,88	0,45	2,25	17,01	19,26	1,30	0,39	17,29	17,67	0,55	10,76	16,95	27,71	2,54
10	3,74	4,91	8,65	0,60	2,27	19,34	21,61	1,31	0,41	20,02	20,43	0,33	10,81	19,12	29,93	2,99
12	3,79	5,46	9,25	0,67	2,33	21,07	23,40	1,21	0,47	22,29	22,76	0,26	10,87	20,69	31,56	3,10
15	3,84	6,47	10,31	0,81	2,35	23,95	26,30	0,99	0,49	26,63	27,12	0,39	10,91	23,91	34,82	3,25
19	3,85	7,41	11,25	0,84	2,37	26,88	29,25	1,05	0,50	29,99	30,49	0,56	10,92	26,48	37,40	3,19

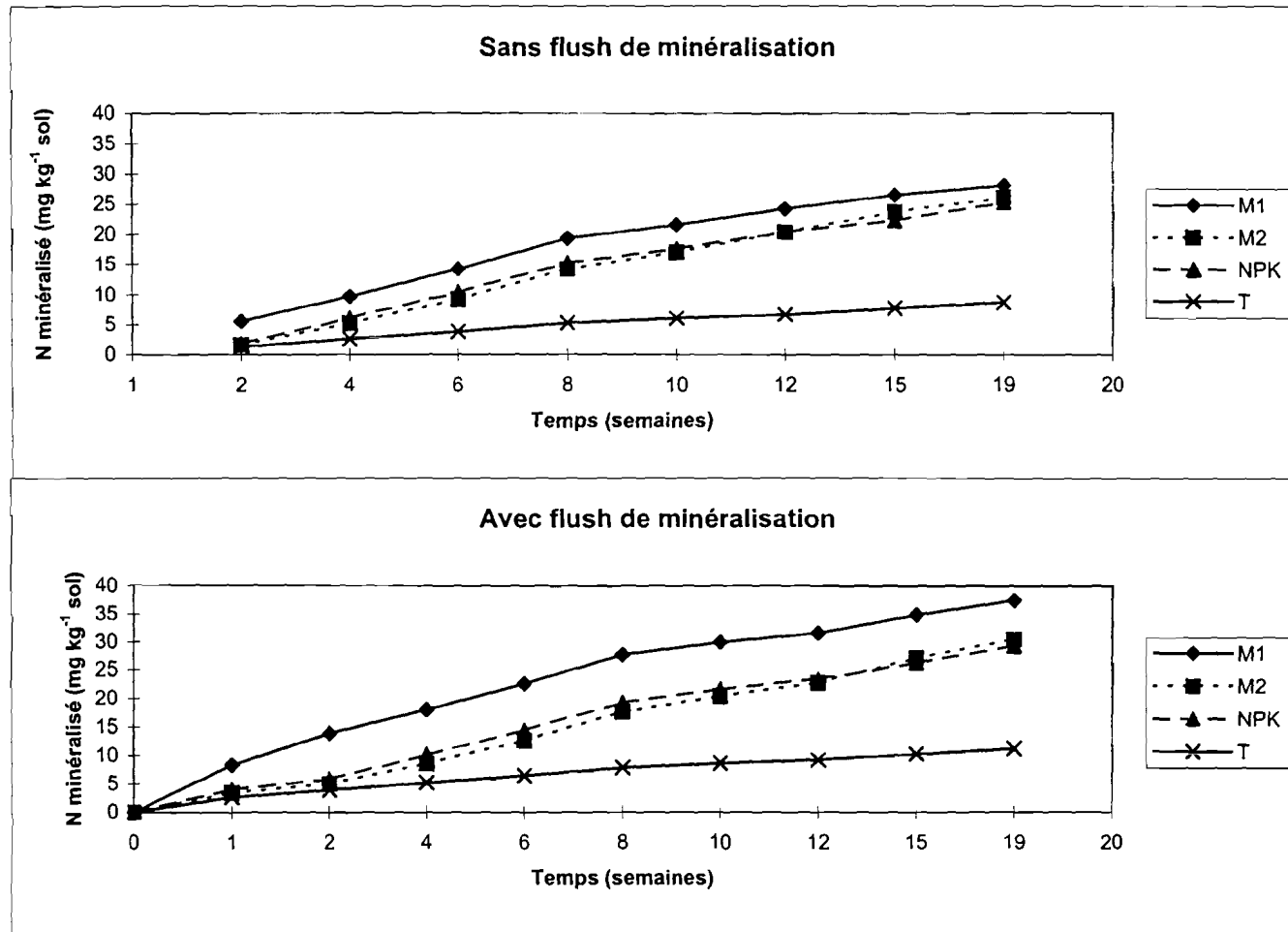
N.NH4 : azote ammoniacal; N.NO3 : azote nitrique; N.min. : azote minéralisé

Et. = écart-type

Annexe VI.3 a : Quantités cumulées d'azote minéralisé (mg kg^{-1} sol) selon les traitements avec et sans flush de minéralisation couche : 0-10 cm.
Année 1995



Annexe VI.3 b : Quantités cumulées d'azote minéralisé (mg kg^{-1} sol) selon les traitements avec et sans flush de minéralisation couche 10-20 cm. Année 1995



Annexe VI.4 : Azote du flush, azote minéral initial et azote potentiellement (mg kg⁻¹ sol) selon les traitements.
Année 1995

Profondeurs Traitements	Nd		Nmi		Nflush	
	0 - 10 cm	10 - 20 cm	0 - 10 cm	10 - 20 cm	0 - 10 cm	10 - 20 cm
T	10,50a	9,67f	3,16a	4,96b	0,34a	1,33c
NPK	43,65b	36,73e	6,37g	5,42e	0,98b	2,19e
M1	42,13b	40,06d	4,55c	5,10d	4,17g	2,82f
M2	41,89b	36,60c	5,88f	5,21d	1b	1,81d

Nd sans flush = valeurs de l'azote potentiellement minéralisable sans le flush de
l minéralisation (mg kg⁻¹ de sol)

Nflush = azote après une semaine d'incubation (mg kg⁻¹ de sol)

Nmi = azote minéral initial. (mg kg⁻¹ de sol)

NB : Les teneurs suivies de lettres différentes diffèrent significativement au seuil
de probabilité de 5% selon le test de NEWMAN-KEULS.

Annexe VI.5 : Variation interannuelle des teneurs en N (g kg^{-1} sol) de 1988 à 1995 dans la couche 0-40 cm du sol selon les traitements.

Chaque point est assorti de l'écart-type de la moyenne (Sx).

Années	Teneurs.traitement ⁻¹ .an ⁻¹ (g kg^{-1})			
	M1	M2	NPK	T
1988	0,34 ± 0,01	0,37 ± 0,02	0,37 ± 0,01	0,43 ± 0,03
89	0,46 ± 0,02	0,47 ± 0,02	0,41 ± 0,02	0,38 ± 0,02
90	0,52 ± 0,02	0,42 ± 0,01	0,42 ± 0,02	0,35 ± 0,02
91	0,57 ± 0,03	0,43 ± 0,02	0,43 ± 0,02	0,33 ± 0,02
92	0,63 ± 0,03	0,43 ± 0,02	0,44 ± 0,03	0,32 ± 0,02
93	0,65 ± 0,03	0,46 ± 0,03	0,44 ± 0,03	0,28 ± 0,01
94	0,68 ± 0,04	0,45 ± 0,03	0,46 ± 0,03	0,28 ± 0,01
95	0,69 ± 0,04	0,48 ± 0,04	0,46 ± 0,04	0,27 ± 0,01

Annexe VI.6 : Teneurs et contenus en azote des épis et rafles des traitements de 1988 à 1995. Essai au champ Mucuna-maïs, Agonkanmey.

Années	Traitements											
	T			NPK			M2			M1		
	N	Poids épis	N	N	Poids épis	N	N	Poids épis	N	N	Poids épis	N
	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
1988	0,80 ± 0,05	430 ± 25	3,4 ± 0,85	0,79 ± 0,08	820 ± 44	6,51 ± 1,14	1,55 ± 0,10	390 ± 31	6,06 ± 1,02	0,76 ± 0,06	830 ± 39	6,28 ± 0,92
1989	0,82 ± 0,04	380 ± 32	3,11 ± 0,97	1,26 ± 0,09	800 ± 38	10,1 ± 0,86	1,49 ± 0,15	830 ± 52	12,41 ± 1,18	0,81 ± 0,08	1240 ± 68	10,01 ± 0,75
1990	0,82 ± 0,06	340 ± 20	2,8 ± 0,94	1,56 ± 0,12	970 ± 48	15,12 ± 0,91	1,59 ± 0,09	630 ± 48	10,00 ± 0,95	1,15 ± 0,11	1560 ± 84	18,00 ± 1,10
1991	0,89 ± 0,05	290 ± 21	2,6 ± 0,92	1,51 ± 0,22	1130 ± 55	17,02 ± 1,53	1,73 ± 0,08	1040 ± 56	18,01 ± 0,71	1,29 ± 0,09	1865 ± 96	24,02 ± 0,87
1992	0,96 ± 0,06	260 ± 12	2,51 ± 0,78	1,59 ± 0,18	1880 ± 62	30,01 ± 1,18	1,51 ± 0,13	930 ± 52	14,01 ± 1,02	1,27 ± 0,07	2370 ± 136	30,01 ± 0,79
1993	1,09 ± 0,06	220 ± 14	2,42 ± 0,84	1,54 ± 0,07	1950 ± 78	30,02 ± 0,60	1,54 ± 0,11	1750 ± 93	27,02 ± 0,89	1,18 ± 0,08	2875 ± 188	34,06 ± 0,94
1994	1,05 ± 0,04	190 ± 15	2,01 ± 0,88	1,37 ± 0,06	2190 ± 125	30,01 ± 0,72	1,76 ± 0,09	1650 ± 89	29,00 ± 0,74	1,25 ± 0,06	3280 ± 231	41,02 ± 0,85
1995	1,33 ± 0,07	150 ± 12	2,00 ± 0,96	1,51 ± 0,11	2550 ± 182	38,51 ± 0,10	1,51 ± 0,12	2260 ± 123	34,10 ± 0,75	1,51 ± 0,09	3500 ± 230	53,01 ± 0,89
Total		2260 ± 682	20,85 ± 2,53		12290 ± 2195	177,39		9480 ± 209	150,61		17520 ± 1948	216,41

Chaque donnée est la moyenne de 10 répétitions (mini-parcelles de récolte) par bande de culture assortie de l'écart-type de la moyenne.

Annexe VI.7 : Variation saisonnière des stocks d'azote minéral ($\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$) dans les couches 0-20 et 20-40 cm.

Chaque valeur de N est assortie de l'écart-type de la moyenne (Sx)

Années 1994 et 1995

		Stocks N traitement ⁻¹			
		(kg ha ⁻¹ an ⁻¹)			
		M1	M2	NPK	T
0-20 cm	M	10,6 ± 1,1	7,7 ± 0,3	7,4 ± 0,4	3,8 ± 0,2
	A	12,6 ± 0,9	12,6 ± 1,0	10,8 ± 0,3	4,6 ± 0,2
	M	15,5 ± 1,3	16,1 ± 1,2	13,2 ± 0,8	5,1 ± 0,3
	J	9 ± 0,6	8,6 ± 0,5	8,1 ± 0,3	2,2 ± 0,2
	J	2,8 ± 0,2	3,6 ± 0,1	3,1 ± 0,2	0,5 ± 0,1
	A	3,2 ± 0,2	3,8 ± 0,2	3,6 ± 0,3	0,8 ± 0,1
	S	6,6 ± 0,4	5,9 ± 0,3	6 ± 0,3	2,2 ± 0,2
	da	1,4	1,5	1,5	1,5
20-40 cm	M	4,4 ± 0,1	1,7 ± 0,1	4,1 ± 0,2	2,6 ± 0,1
	A	6,6 ± 0,2	6,3 ± 0,4	5,3 ± 0,3	3,2 ± 0,2
	M	8,3 ± 0,2	7,8 ± 0,3	6,1 ± 0,3	4,2 ± 0,3
	J	8,9 ± 0,3	8,8 ± 0,3	6,3 ± 0,2	4,3 ± 0,2
	J	10,3 ± 0,6	9,8 ± 0,4	6,7 ± 0,3	3,8 ± 0,3
	A	1,2 ± 0,06	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1	0,3 ± 0,02
	S	2,2 ± 0,1	2,5 ± 0,1	1,8 ± 0,1	0,4 ± 0,03
	da	1,5	1,5	1,5	1,6

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....	I
RESUME.....	VII
SOMMAIRE.....	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	I
PREMIERE PARTIE.....	9
CHAPITRE I : MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN.....	11
SITUATION DE LA STATION DE RECHERCHE.....	11
LE CLIMAT.....	11
LA VEGETATION.....	15
MODELE ET HYDROGRAPHIE.....	17
GEOLOGIE.....	17
SOLS.....	19
MILIEU HUMAIN ET OCCUPATION DES SOLS.....	19
CHAPITRE II : LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL, LA PRESENTATION DU <i>MUCUNA UTILIS</i> ET DES SOLS ETUDIES.....	23
DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	23
TRAITEMENTS.....	25
HISTORIQUE ET CARACTERISTIQUES DU <i>MUCUNA Pruriens utilis</i>	27
CALAGE DES CYCLES MAÏS ET <i>MUCUNA</i>	29
CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES.....	33
DEUXIEME PARTIE : INFLUENCE DU SYSTEME <i>MUCUNA</i>-MAÏS SUR LA PRODUCTION, LES NIVEAUX DE RESTITUTION ET LES PROPRIETES DU SOL.....	43
CHAPITRE III : INFLUENCE DU SYSTEME <i>MUCUNA</i>-MAÏS SUR LA PRODUCTION EN MAÏS ET LES RESTITUTIONS AU SOL.....	45
METHODOLOGIE.....	45
PRELEVEMENTS DES PLANTES.....	45
METHODES ANALYTIQUES.....	47
RESULTATS.....	47
RENDEMENTS EN MAÏS DE 1988 A 1996.....	47
DYNAMIQUE SAISONNIERE DE LA PRODUCTION VEGETALE DU MAÏS ET DU <i>MUCUNA</i>	49
RESTITUTIONS ORGANIQUES ET MINERALES SOUS FORME VEGETALE.....	51
DISCUSSION.....	57
EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES VARIATIONS INTERANNUELLES DES RENDEMENTS.....	57
EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA DYNAMIQUE SAISONNIERE DE LA PRODUCTION VEGETALE.....	59
EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LE NIVEAU DES RESTITUTIONS ORGANIQUES ET MINERALES AU SOL.....	61
CONCLUSION.....	61

QUELQUES ASPECTS ECONOMIQUES DE LA MISE EN VALEUR DU SYSTEME MUCUNA-MAÏS.....	65
ENVIRONNEMENT SOCIO-ECONOMIQUE.....	65
INTERETS ET INCONVENIENTS LIES A L'UTILISATION DU SYSTEME MUCUNA-MAÏS.....	67
QUELQUES DONNEES ECONOMIQUES.....	69
CHAPITRE IV : INFLUENCE DU SYSTEME MUCUNA-MAÏS SUR LES PROPRIETES DU SOL.....	71
METHODOLOGIE.....	71
PRELEVEMENTS DE SOL.....	71
METHODES ANALYTIQUES.....	73
RESULTATS.....	73
HETEROGENEITE INITIALE DES PARCELLES.....	73
CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU SOL.....	75
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU SOL.....	77
CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU SOL.....	81
DISCUSSION.....	85
EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET PHYSIQUES DES SOLS.....	87
EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LE STATUT ORGANIQUE DU SOL (C, N) ET LES AUTRES PROPRIETES DU SOL.....	89
CONCLUSION.....	89
TROISIEME PARTIE : INFLUENCE DU SYSTEME MAÏS-MUCUNA SUR LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE ET DE L'AZOTE.....	93
CHAPITRE V : EFFET DU SYSTEME MUCUNA-MAÏS SUR LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE.....	95
MATERIEL ET METHODE.....	95
RAPPEL.....	95
DOSAGE DE L'HUMIDITE.....	99
TETERMINATION DU CARBONE ET DE L'AZOTE.....	101
RESULTATS.....	103
VARIATION INTERANNUELLE (1988-1996) ET EVOLUTION DANS LE PROFIL DES TENEURS ET STOCKS DE CARBONE TOTAL DU SOL.....	103
FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL.....	103
DISCUSSION.....	119
EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES VARIATIONS INTERANNUELLES DES TENEURS EN C ET N TOTAUX DES SOLS.....	119
QUELS SONT LES COMPARTIMENTS ORGANIQUES IMPLIQUES DANS LES VARIATIONS DU C TOTAL.....	121
CONCLUSION.....	125
CHAPITRE VI : EFFETS DU SYSTEME MUCUNA-MAÏS SUR LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE.....	129
DYNAMIQUE DE L'AZOTE MINERAL ET EVALUATION DE L'AZOTE POTENTIELLEMENT MINERALISABLE.....	129
INTRODUCTION.....	129
APERCU BIBLIOGRAPHIQUE.....	131
MATERIEL ET METHODES.....	135
RESULTATS.....	139
DISCUSSION.....	147
INFLUENCE DU SYSTEME MUCUNA-MAÏS SUR LE BILAN DE L'AZOTE DANS LE SYSTEME DANS LE SYSTEME SOL PLANTES.....	153
OBJECTIF.....	153
METHODOLOGIE.....	153
RESULTATS ET DISCUSSION.....	157
CONCLUSION.....	167
CONCLUSION GENERALE.....	171

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....183

ANNEXES.....213

II.....	221
III.....	222
IV.....	223
V & VI.....	227
