



Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération



milieux et activité agricole

UR 3D



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).

Bernard BACYE

Laboratoire de comportement des sols cultivés

29 AVRIL 1994

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39529

Cote : A

Document Orstom Montpellier, 1993, n° 6

Bernard BACYE

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)

Montpellier Orstom 1993

Les opinions exprimées dans ce document
n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre de l'unité de recherche "Fonctionnement des sols, utilisation de l'eau et élaboration des rendements" (UR 3D de l'Orstom), au centre Orstom et au Bunasols (Bureau national des sols du Burkina Faso), à Ouagadougou, et au centre Orstom de Montpellier, sous la direction de M. le Professeur R. NEGRE (faculté des Sciences de Saint-Jérôme) et de R. MOREAU (Orstom) pour l'obtention, par l'auteur, du titre de :

Docteur de l'université d'Aix-Marseille III

La soutenance a eu lieu à la faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme, le 2 juillet 1993.

© Centre Orstom de Montpellier, 1993

**UNIVERSITE DE DROIT, D'ECONOMIE ET DES SCIENCES
(AIX - MARSEILLE III)**

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE SAINT-JEROME

T H E S E

présentée par

Bernard BACYE

pour obtenir le diplôme de Docteur en Sciences
de l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences
d'Aix-Marseille

Spécialité :

Physiologie, Biologie des organismes et des populations
Option : Agronomie

**INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURE SUR L'EVOLUTION DU
STATUT ORGANIQUE ET MINERAL DES SOLS FERRUGINEUX ET
HYDROMORPHES DE LA ZONE SOUDANO-SAHELIENNE
(PROVINCE DU YATENGA, BURKINA FASO)**

soutenu le 02 Juillet 1993 devant le jury composé de :

- | | |
|---------------------|---|
| MM. R. NEGRE | Professeur, Faculté des Sciences de Saint-Jérôme,
<i>Président</i> |
| G. AUBERT | Maître de Conférences, Faculté des Sciences de Saint-
Jérôme |
| M. BOUNIAS | Professeur, Faculté des Sciences d'Avignon, <i>Rapporteur</i> |
| R. MOREAU | Directeur de Recherche, ORSTOM de Montpellier |
| J.P. PELTIER | Maître de Conférences, Faculté des Sciences de Grenoble,
<i>Rapporteur</i> |
| C. FELLER | Directeur de Recherche, ORSTOM de Montpellier |



= 9 MAI 1994

F 39529

*A la mémoire de mon père, Bagora Emmanuel, décédé le
14 Mai 1968, au moment où j'entrais à l'école.*

*A la mémoire de mes oncles, Nékilma Vincent de Paul et
Bavour Jean-Baptiste, décédés pendant mon séjour en
France.*

AVANT PROPOS

Avant de présenter les résultats de ce travail, je tiens à remercier les nombreuses personnes qui, au Burkina Faso comme en France, ont contribué à sa réalisation.

Monsieur Robert NEGRE, Professeur à la Faculté des Sciences de Saint-Jérôme, a autorisé mon inscription en thèse. Ses nombreux conseils et suggestions ont été d'un concours inestimable dans la réalisation de ce travail. Malgré ses nombreuses occupations, il a consacré beaucoup de son temps à la lecture du manuscrit. Je lui exprime ma profonde gratitude.

Monsieur Roland MOREAU, Directeur de Recherche à l'ORSTOM, a assuré l'encadrement de ce travail. Ses visites sur le terrain et ses nombreux conseils pendant l'interprétation et la mise en forme des résultats, ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail. Il m'a également donné des outils de réflexion et d'analyse pour l'étude des sols cultivés, qui me serviront aussi dans l'avenir. Je lui suis très reconnaissant.

Monsieur Christian FELLER, Directeur de Recherche à l'ORSTOM, s'est intéressé à mon travail et a accepté de faire partie du jury. Ses critiques et conseils ont apporté plus de clarté et de précision à ce mémoire. Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont également à Messieurs Michel BOUNIAS, Professeur à la Faculté des Sciences d'Avignon et Jean Paul PELTIER, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Grenoble, qui ont accepté de juger ce travail.

Je remercie Monsieur Guy AUBERT, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Saint-Jérôme, qui, malgré ses nombreuses occupations, a relu mon manuscrit et accepté de faire partie du jury.

Monsieur Paul de BOISSEZON m'a beaucoup aidé lors de l'élaboration des protocoles d'études. Il m'a également apporté de nombreux conseils pour l'interprétation des données, en particulier sur la dynamique de la matière organique et de l'azote minéral. Je le remercie du fond du coeur.

Je remercie également Monsieur Jean François VIZIER, Responsable du Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés, pour avoir relu certains chapitres du mémoire et pour ses différentes suggestions lors de la préparation de l'exposé oral.

Je suis redevable à Madame Evelyne GAVINELLI qui a effectué le dosage de carbone organique et à Monsieur Joël FARDOUX qui m'a beaucoup aidé non seulement pour l'étude de la minéralisation de l'azote mais aussi pour le montage de certains graphiques du mémoire.

J'exprime ma reconnaissance à Messieurs Marc VIENNOT, Georges de NONI, Georges-Henri SALA pour leurs suggestions lors de la préparation de l'exposé oral, Eric ROOSE, Marc PANSU, Jean Claude TALINEAU, Philippe de BLIC et Mme Christine LARRE-LARROUY, pour les encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de ce travail.

Pendant mon travail de terrain au Burkina Faso, plusieurs personnes m'ont apporté une aide précieuse. Je leur exprime toute ma gratitude.

Mes remerciements vont particulièrement à :

- Monsieur Georges SERPANTIE, pour m'avoir accepté au sein de l'équipe travaillant dans le "Programme Bidi" et pour ses nombreux conseils et critiques qui m'ont beaucoup aidé, en particulier dans la conduite des études au champ.

- Monsieur Jean Marie LAMACHERE qui a mis à ma disposition toute la logistique ayant permis la réalisation du travail de terrain.

- Monsieur Noumbié SOURABIE, Directeur Général du BUNASOLS, qui m'a accepté dans son service et a beaucoup contribué à la recherche de moyens matériels qui ont été déterminants dans la réalisation du travail de terrain.

- Messieurs Lamoudia THIOMBIANO, pour ses multiples conseils et suggestions, Tidiani PARE, Moussa SAWADOGO et Victor BOMBIRI du Laboratoire d'analyses du BUNASOLS, pour leur collaboration.

- Monsieur Prosper ZOMBRE, Maître Assistant à l'Université de Ouagadougou, pour ses nombreux conseils et pour m'avoir permis d'effectuer les tests de minéralisation du carbone dans son laboratoire.

- Monsieur Michel SEDOGO, Directeur Général du CNRST et Responsable du Laboratoire d'Agropédologie de l'INERA, qui m'a donné de précieux conseils, en particulier pour le fractionnement granulométrique de la matière organique.

- Monsieur Alfred TRAORE, Recteur de l'Université de Ouagadougou et Responsable du Laboratoire de Biotechnologie, qui m'a autorisé à effectuer certains dosages d'azote total dans son laboratoire.

Je voudrais remercier également tout le personnel du Centre ORSTOM de Ouagadougou ainsi que le personnel du BUNASOLS, pour le chaleureux accueil qu'ils m'ont réservé.

Je dis également un grand merci à tous mes collègues et amis au Centre ORSTOM de Montpellier pour leur soutien quotidien : Mathurin Yves DJONDO, Cyrille DOSSA, Luc SIGHA-NKAMDJOU, Fouad DAAF, Issa SIDIBE, Pierre KENGNE, Komi ASSEGBETE. Je n'oublierai pas ceux qui sont déjà partis de l'ORSTOM, Narcisse DJEGUI, Jean de Dieu NZILA, Fujio NAGUMO, José Luis GONZALEZ-BARRIOS et Valérie TAUVIN.

J'associe à ces remerciements, toute ma famille et particulièrement, mon frère aîné Zilma François qui a su me motiver tout au long de mes études, Pascaline et notre fils Jean François Régis qui ont accepté de supporter mon absence prolongée.

RESUME

L'influence des systèmes de culture pratiqués au nord du Burkina Faso, a été étudiée en comparant les niveaux organique et minéral du sol sous différentes parcelles. Les sols concernés sont un sol ferrugineux peu lessivé en mi-pente, un sol ferrugineux lessivés en bas de pente et un sol hydromorphe peu humifère à pseudogley de bas-fond.

Par rapport à une jachère de 15 ans (mi-pente) ou à une forêt galerie dégradée (bas-fond), les systèmes de culture continue sans restitution organique entraînent, une baisse du niveau organique (40 à 50 %) et minéral (22 à 56 %) de la couche 0-10 cm.

Inversement, dans les systèmes de culture pratiquant la fumure organique (bas de pente), il y a une augmentation du niveau organique et minéral de la couche 0-10 cm, proportionnellement au régime des restitutions. La pratique de parcage du bétail s'avère très efficace : les teneurs en carbone organique et azote totaux augmentent de 50 %, celles en bases échangeables et phosphore total sont multipliées par 2 et le pH monte de plus d'une unité.

Les teneurs en azote minéral au cours du cycle cultural dépendent du niveau organique des sols. Mais le sens d'évolution des teneurs en azote minéral suit, indépendamment des systèmes de culture, quatre phases bien distinctes montrant un décalage entre la période où les teneurs sont élevées et le moment où les besoins azotés des plantes sont grands.

L'apport de la poudrette de fumier et de paille de mil permet, malgré une vitesse de décomposition très rapide mais variable en fonction du type de sol (0,033 à 0,052 % /jour pour un sol sableux de mi-pente contre 0,015 à 0,019 % /jour pour un sol argilo-limoneux de bas-fond), une augmentation des stocks de matière organique. Un accroissement des teneurs en azote minéral du sol est observé dès la première saison avec une arrière-effet bien marqué.

Pour cette zone, l'amélioration de la fertilité des sols passe par une gestion de la matière organique entre l'agriculture et l'élevage avec une utilisation différenciée de l'espace.

Mots clés : sol ferrugineux, sol hydromorphe, statuts organique et minéral, azote minéral, systèmes de culture, zone soudano-sahélienne, Burkina Faso.

ABSTRACT

The objective of this study was to compare the organic and inorganic levels encountered in two ferruginous slope soils (mid-slope ; foot slope) and an hydromorphic swallow soil, all brought under cultivation in Northern part of Burkina Faso.

The organic and inorganic levels observed in cultivated soils - where no organic amendments were applied - represented 40 to 50 % and 22 to 56 %, respectively, of those of soils under fallow or swallow soils under gallery forest.

On the opposite, the organic and mineral levels increased with the rates of organic applications.

During the cultivation period, the inorganic nitrogen contents varied according to the organic matter level of the soil ; but, independently of the cultivation systems, these evolved in four separate stages, with a lag in between the period when the highest contents could be observed and the important nitrogen requirements of the plants.

Soil fertility can be improved by the appropriate management of organic matter through farming and cattle breeding.

Key words :

Ferruginous soils - hydromorphic soils - organic and inorganic status - inorganic nitrogen - cropping systems - Burkina Faso.

INTRODUCTION GENERALE

Le problème du maintien de la fertilité des sols se pose toujours lors de la mise en culture des terres agricoles. Traditionnellement, c'est le système cultural basé sur la rotation culture/jachère de longue durée qui permettait de répondre à cette préoccupation. Ainsi, le sol était cultivé pendant un certain temps (3 à 5 ans) avant d'être abandonné pendant une période suffisamment longue pour restaurer sa fertilité. La pérennité d'une telle agriculture suppose, bien entendu, une grande disponibilité de terres cultivables. Or en zone soudano-sahélienne, les contraintes d'ordre climatique, socio-économique et démographique, ont entraîné une forte pression sur les terres au cours des trois dernières décennies.

Le Burkina Faso appartient à cette zone avec une population qui croît au taux annuel moyen de 3 % et avec plus de 80 % de cette population vivant des activités agricoles. Ce qui entraîne des besoins en terres de plus en plus élevés. La FAO (1986) estime qu'environ 10 % de la superficie totale du territoire, soit 2,8 millions d'hectares, sont cultivés chaque année. Mais c'est surtout au nord du pays où la pluviosité est plus faible et où l'agriculture et l'élevage se côtoient sans vraiment s'intégrer, que la pression sur les terres et la végétation est très forte. C'est le cas de la province du Yatenga où les besoins en terres agricoles sont tels que la pratique de la jachère devient problématique (FAO, 1975)

Dans la province Yatenga, MARCHAL (1977 et 1983), BILLAZ et DIAWARA (1983) et SERPANTIE *et al.* (1988) montrent que la faible disponibilité des terres associée aux contraintes climatiques, a entraîné de profondes modifications dans le système cultural traditionnel. Les grands traits de ces modifications sont :

- la mise en place de systèmes de culture permanents, très souvent sans fumure;
- l'extension de l'espace cultivé à des terres marginales très sensibles à l'érosion hydrique et éolienne ;
- l'installation de la culture continue de sorgho dans les bas-fonds autrefois cultivés en coton ou réservés au pâturage;
- l'exportation quasi générale des résidus de récoltes pour les besoins de chauffage domestique ou pour l'affouragement de saison sèche ;
- l'adoption, cependant dans quelques exploitations, de pratiques culturales améliorantes (fumure organique de plus en plus étendue aux champs éloignés des habitations, travail du sol, lutte antiérosive, etc...)

Dans cette nouvelle dynamique, la rotation culture/jachère de longue durée est de moins en moins pratiquée. Ce qui montre la nécessité de mettre en place d'autres modes de gestion des sols. Les nouveaux systèmes de culture devraient assurer une certaine sécurité alimentaire des populations tout en protégeant les sols contre la dégradation physique, chimique et biologique (PIERI, 1985 et 1989, ROOSE, 1984 et

1986). Une bonne connaissance des comportements des sols vis-à-vis des techniques culturales et des systèmes de culture s'avère indispensable. Ceci est d'autant plus nécessaire que la fertilité originelle de la plupart des sols est relativement faible (BOULET, 1968) : faibles teneurs en matière organique, faibles teneurs en bases échangeables, carence en phosphore, faible capacité de rétention en eau.

Dans la zone étudiée, de nombreux travaux de recherche basés sur la gestion de la matière organique (résidus de récolte et fumier) et des engrais minéraux associés ou non au labour dans différentes rotations culturales, sont effectués depuis une trentaine d'années. Ils ont permis de mettre en évidence des possibilités de maintien et/ou d'amélioration de la fertilité des sols dans des systèmes de culture semi-intensifs ou intensifs (BOYER, 1970 ; CHARREAU, 1972 ; CHARREAU et NICOU, 1971 ; PICHOT *et al.*, 1974 ; GANRY *et al.*, 1979 et 1983 ; SEDOGO, 1981 ; PIERI, 1989 et SOME, 1989).

Mais pour des raisons socio-économiques et/ou techniques, l'agriculture paysanne est encore différente de celle pratiquée en station de recherche. Et l'influence des systèmes de culture paysans (ou des pratiques culturales) sur les transformations des caractéristiques des sols, reste insuffisamment connue. La plupart des travaux entrepris dans ce sens ont surtout étudié l'effet de la durée de mise en culture sur l'évolution des sols (FAUCK *et al.*, 1969 ; SIBAND, 1972 et 1974, FELLER et MILLEVILLE, 1977, PALLO, 1982). Ces auteurs montrent que, par rapport au sol resté sous végétation naturelle, la culture continue entraîne une baisse des paramètres de fertilité (diminution des teneurs en matière organique, du pH, du pouvoir minéralisateur et de la stabilité structurale et un appauvrissement du complexe adsorbant). Plus de la moitié de cette baisse, surtout en ce qui concerne les paramètres chimiques, a lieu pendant les 3 à 5 premières années de mise en culture. Mais très peu de travaux (SEDOGO, 1981) ont comparé différents systèmes de culture paysans entre eux.

Par ailleurs les agrosystèmes paysans utilisent peu ou pas d'engrais minéraux. C'est la matière organique du sol qui doit assurer les réserves en éléments nutritifs. Dans la région, cette fonction centrale de la matière organique comme indicateur d'évolution et comme facteur de fertilité physique et chimique, est confirmée par plusieurs travaux dont BOYER (1970), PICHOT (1975) et PIERI (1989) font la synthèse. SEDOGO (1981) a observé, dans une zone à forte pression démographique, une baisse de la fertilité chimique des sols au fur et à mesure que l'on s'éloigne des habitations. Ce gradient décroissant de fertilité est attribué aux modes de gestion des résidus organiques. Le rôle de la matière organique semble être bien connu des paysans qui pratiquent de plus en plus la fumure organique. Mais l'entretien ou l'amélioration du niveau organique du sol nécessite une bonne connaissance des processus de minéralisation de la matière organique en relation avec les conditions pédo-climatiques.

L'étude de l'influence des systèmes de culture sur les caractéristiques des sols et de la dynamique de la matière organique et de l'azote minéral dans les conditions pédoclimatiques de la région de Bidi au nord-ouest du Yatenga, abordée dans ce travail, s'inscrit dans ce contexte avec pour objectifs :

- d'analyser les modifications des caractéristiques des sols dans les principaux agrosystèmes considérés ;
- d'étudier au cours de la saison de culture l'influence de ces modifications sur la dynamique de l'azote minéral ;
- d'étudier les effets des apports organiques sur la dynamique à court terme de la matière organique et de l'azote minéral du sol.

Cette étude s'intègre dans un programme pluridisciplinaire entrepris par l'ORSTOM depuis 1983 dans le but de mieux comprendre les contraintes physiques et biologiques au développement agricole de la région de Bidi.

L'approche retenue associe des méthodes d'enquête, de suivi et d'expérimentation au champ et au laboratoire.

Le mémoire, qui suit l'ordre du travail effectué, comporte quatre parties.

La **première partie** est consacrée à la description des sols et des systèmes de culture qui leur sont associés après une présentation préalable des milieux physique et humain. Trois types de sols correspondant à trois situations topographiques (sol ferrugineux peu lessivé sableux en mi-pente, sol ferrugineux lessivé sablo-argileux à argilo-sableux en bas de pente et sol hydromorphe peu humifère à pseudogley argilo-limoneux de bas-fond) et huit systèmes de culture différents ont été retenus.

La **deuxième partie** du travail porte sur la caractérisation de l'état morphologique, physique, chimique et biologique des sols soumis aux différents systèmes de culture.

La **troisième partie** est consacrée à l'évolution saisonnière de l'azote minéral au cours de la saison des pluies.

La **quatrième partie** porte sur l'étude expérimentale de la dynamique de la matière organique et de l'azote minéral dans les conditions pédoclimatiques de mi-pente (sol sableux drainé) et de bas-fond (sol argilo-limoneux mal drainé) avec et sans apport de poudrette de fumier et de paille de mil.

Une synthèse des résultats obtenus à plusieurs niveaux d'études (parcelles, expérimentation *in situ* et en laboratoire), permet de tirer des enseignements et recommandations concernant les problèmes d'évolution et d'entretien de la fertilité des sols dans les agrosystèmes étudiés.

Première partie :

**CONDITIONS DU MILIEU ET CARACTERISTIQUES
DES SITUATIONS ETUDIEES**

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE

MOREL (1989) décrit le sol comme un système compartimental entretenant de multiples transferts , entre ses principaux compartiments d'une part et avec le milieu extérieur d'autre part. Ces transferts, de caractère physique, chimique et biologique, sont à l'origine de l'évolution du sol.

Parmi les éléments du milieu extérieur, la végétation, le climat local et les activités humaines joueraient un rôle déterminant dans l'évolution des sols cultivés. L'état physique, chimique et biologique d'un sol, à un moment donné, résulte de l'action combinée des différents facteurs et conditions du milieu (GREENLAND, 1964 ; SANCHEZ, 1976). Aussi est-il nécessaire , dans toute étude qui cherche à comprendre le comportement d'un sol par rapport à un facteur précis, de bien connaître le contexte général du milieu.

C'est l'objectif de cette première partie du mémoire qui se propose, dans un premier chapitre de caractériser le milieu concerné tant du point de vue du climat, du relief, des sols et de la végétation que des activités agricoles. Dans un second chapitre, seront présentées en détail les caractéristiques des sols et des systèmes de culture étudiés.

CHAPITRE I

PRESENTATION DU MILIEU

La présente étude a été conduite à proximité du village de Bidi (13°55' de latitude et 2°40' de longitude) situé à 50 km au nord-ouest de Ouahigouya dans la province du Yatenga au Burkina Faso (fig.I.1). La zone concernée qui s'étend sur 400 km² environ, fait l'objet d'un programme d'études pluridisciplinaires entrepris par l'ORSTOM depuis 1983. On dispose donc, depuis cette date, de données générales locales concernant le climat, le relief, les sols, la végétation et les activités humaines.

Après avoir caractérisé la région de Bidi par rapport au climat général du Burkina Faso, ce chapitre présentera ces données.

1. CLIMAT

Le climat général du Burkina Faso est caractérisé, au cours de l'année, par deux saisons bien contrastées : une saison de pluies de 4 à 6 mois (mai/juin à octobre) et une saison sèche de 6 à 8 mois consécutifs (novembre à avril/mai). Le territoire comporte trois grandes zones climatiques (PALLIER cité par SOME, 1989) comme le montre la figure I.2 : suivant les isohyètes moyennes annuelles, on distingue du nord vers le sud, une zone sahélienne au nord de l'isohyète 650 mm, une zone nord-soudanienne comprise entre 650 et 1000 mm et une zone sud-soudanienne au-dessus de 1000 mm. La province du Yatenga appartient à la zone de climat nord-soudanien avec une pluviométrie annuelle comprise entre 600 et 750 mm. La saison sèche dure de 7 à 8 mois. Le Yatenga même peut être divisé en plusieurs zones de pluviométrie croissante du nord vers le sud (DUGUE, 1989). Par exemple, entre 1983 et 1991, Ouahigouya et Bidi plus au nord (fig. I.1), ont enregistré respectivement 528 et 445 mm de pluie en moyenne.

Depuis plus de trois décennies, on observe une forte diminution, de 100 à 200 mm, de la pluviosité de chaque zone.

1.1. Précipitations et évapotranspiration

Le tableau I.1. regroupe le total pluviométrique mensuel et annuel enregistré entre 1983 et 1991 à BIDI. La pluviométrie accuse des variations importantes d'une année à l'autre (205,4 à 604,8 mm) autour d'une moyenne de 445 mm.

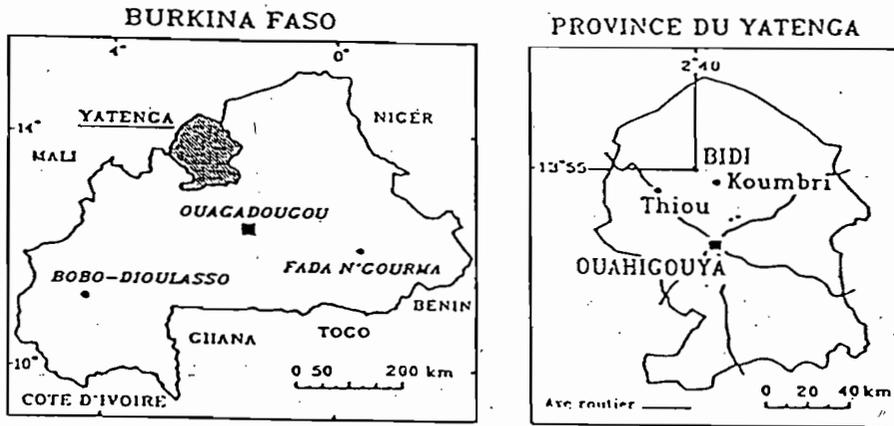


Figure I.1 : Localisation de la zone d'étude

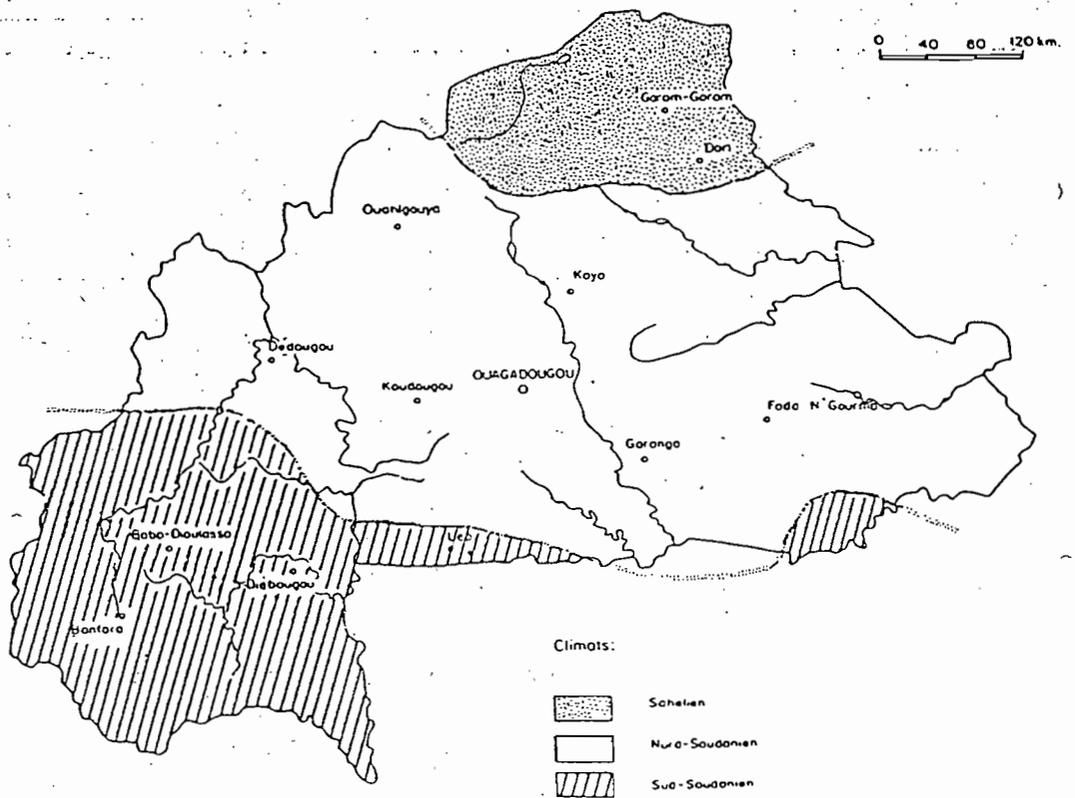


Figure I.2 : Les Zones climatiques du BURKINA FASO

La saison pluvieuse est marquée par une mauvaise répartition des pluies dans le temps. Des périodes sèches, de 5 à 15 jours consécutifs sans pluies, peuvent se produire jusqu'à 6 fois en moyenne par saison (tableau.I.2). Ces périodes sont plus nombreuses et plus longues en début (juin) et en fin (septembre) de saison pluvieuse . Les mois de juillet et d'août sont les plus pluvieux comme le montre le diagramme ombrothermique (fig.I.3). De 1983 à 1991, la dernière décade de juillet et la première décade d'août ont été les plus humides selon les relevés météorologiques non reproduits ici.

Tableau I.1 : Pluviométrie mensuelle (en mm) à Bidi de 1983 à 1991.

Années	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total annuel
1983	28,9	54,3	140,0	90,0	102,5	0,0	415,7
1984	12,5	32,8	95,7	73,5	25,9	9,9	250,4
1985	5,0	24,3	108,4	152,5	36,5	3,5	330,2
1986	20,0	52,8	165,4	142,3	112,2	21,3	514,0
1987	0,5	38,2	116,3	90,1	168,8	4,5	418,1
1988	39,6	31,1	102,0	327,5	41,3	10,6	548,1
1989	0,8	46,5	144,8	287,5	43,4	29,3	552,3
1990	25,1	28,2	174,1	53,1	60,4	28,5	372,9
1991	34,5	75,3	200,6	222,4	67,3	0,0	604,8
Moyenne	18,5	42,6	138,6	159,9	73,1	12,0	445,2

Figure I.3 : Diagramme ombrothermique à BIDI
(moyennes de 1983 à 1991)

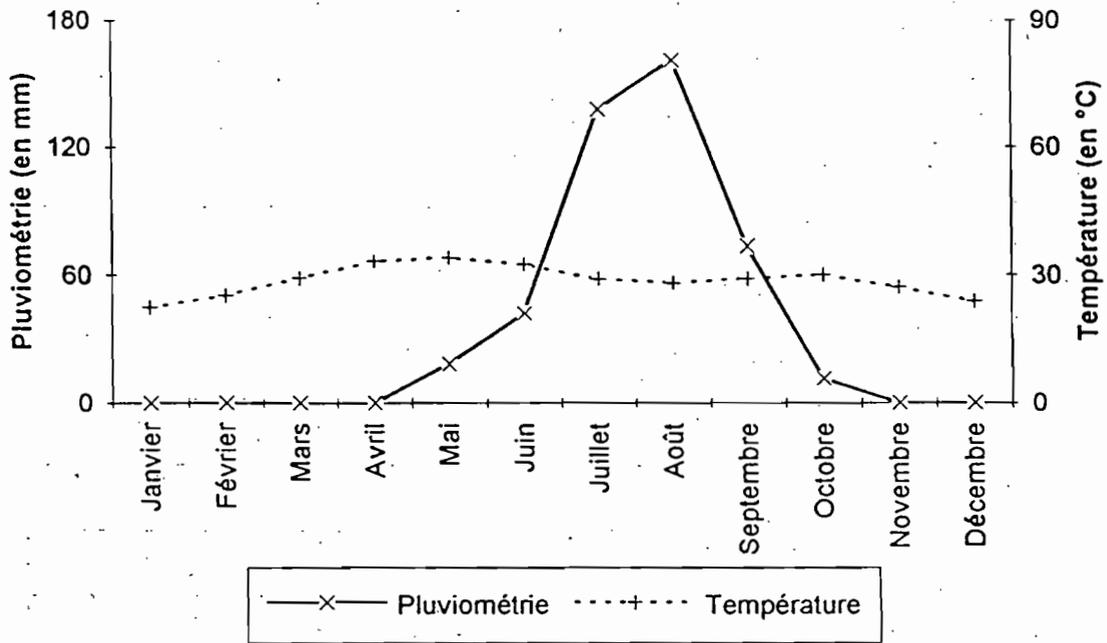


Figure I.4 : Températures décadaires à BIDI
(moyennes de 1983 à 1991)

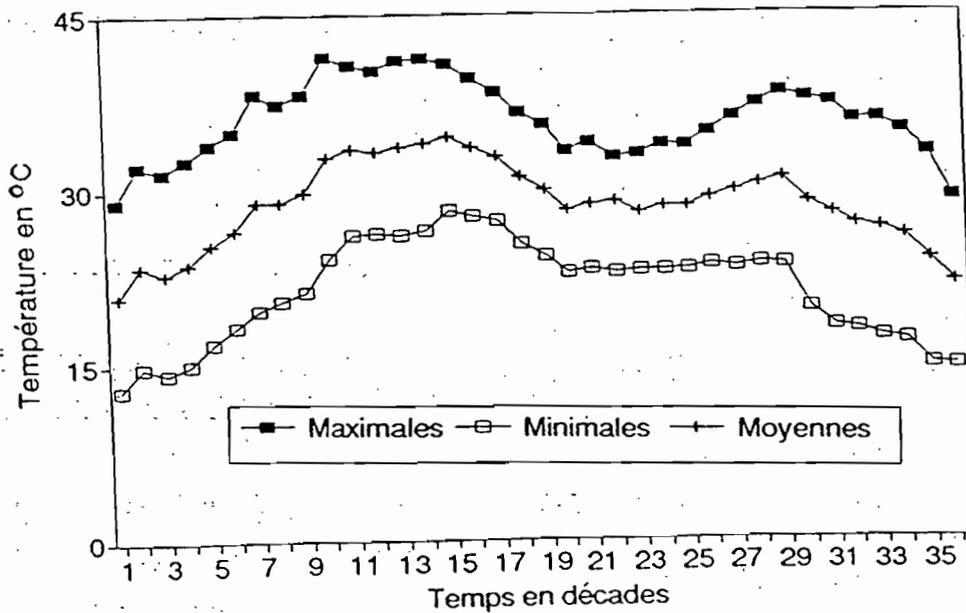


Tableau I.2 : Nombre de périodes sèches de plus de 5 jours consécutifs sans pluies. Entre () le nombre de jours de la période sèche la plus longue.

Années	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
1983	3 (10)	0	2 (8)	2 (5)	7
1984	2 (15)	1 (5)	3 (6)	1 (6)	7
1985	3 (12)	2 (6)	1 (5)	2 (12)	8
1986	3 (8)	1 (9)	1 (5)	1 (6)	6
1987	1 (7)	2 (11)	1 (5)	0	4
1988	3 (14)	1 (7)	0	3 (10)	7
1989	4 (10)	1 (7)	1 (7)	2 (14)	8
1990	2 (15)	0	2 (9)	2 (10)	6
1991	2 (6)	1 (7)	0	2 (12)	5
Moyenne	2,5 (11)	0,9(6)	1,22 (5)	1,67 (9)	6,44 (8)

Chaque année, plus de la moitié des pluies ne dépasse pas 10 mm. Cependant l'intensité des pluies peut atteindre 60 à 120 mm/h surtout en début de saison.

La demande évaporative (ETP Penman) annuelle atteint en moyenne 1900 mm avec un maximum (200 mm) en mai et juin (début de saison de pluies) et un minimum en janvier (130 mm).

1.2. Températures

La figure I.4 présente les températures moyennes décadaires enregistrées sous abri entre 1983 et 1991.

Au cours de l'année, les températures maximales varient de 30 à 41 °C et les minimales de 14 à 34 °C. La moyenne est comprise entre 14 et 34 °C. Les mois d'avril et de mai qui correspondent à l'arrivée des premières pluies de la saison pluvieuse, sont les plus chauds. BERNHARD-REVERSAT (1977) a observé au Sénégal, que pendant cette période, la température peut atteindre 50 °C dans les 10 premiers centimètres du sol. Par contre, la période allant de décembre à février présente les plus faibles températures.

1.3. Vents

Le climat se caractérise par deux vents dominants : en saison sèche (novembre à avril) souffle l'harmattan (vent sec) de l'Est ; la saison pluvieuse est dominée par les vents humides de mousson soufflant du Sud-ouest et de l'Ouest.

D'une façon générale les vitesses moyennes des vents sont assez faibles. Elles varient entre 2 et 5 m.s⁻¹ (CASENAVE ET VALENTIN, 1988 et SOME, 1989). Les plus fortes valeurs, enregistrées pendant le mois de juin ou de juillet (début de saison des pluies), jouent un rôle important dans l'érosion éolienne. Par contre, octobre et novembre qui correspondent à la fin de la saison sont plus calmes.

1.4. Conclusion

La faible pluviosité et la mauvaise répartition des pluies au cours de la saison pluvieuse, ont pour conséquence la réduction de la production végétale naturelle ou cultivée (GREENLAND, 1958 ; CHARREAU, 1972 ; SANCHEZ, 1976 et DALAL *et al.*, 1986). En outre, les fortes températures d'une part et l'alternance de conditions humides et sèches d'autre part, constituent des facteurs favorables aux processus de minéralisation de la matière organique des sols (MOUREAUX, 1968 ; DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; BACHELIER, 1973 et BERNHARD-REVERSAT, 1977).

En début de saison des pluies, la violence des vents et l'intensité des précipitations sont des facteurs d'érosion éolienne et hydrique.

MARCHAL (1977 et 1983) montre que ces caractéristiques pluviométriques entraînent aussi des modifications des pratiques culturales. En effet les paysans augmentent chaque année les superficies emblavées afin d'accroître les chances de récolte.

2. GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE

La géologie de la région de Bidi correspond à un domaine granitique limité au sud-ouest par des formations vulcano-sédimentaires constituées de roches vertes et de schistes et au nord-ouest par des schistes birrimiens. Des formations dunaires anciennes étirées d'est en ouest, occupent également cette région (BOULET, 1968 et GUILLET, 1992).

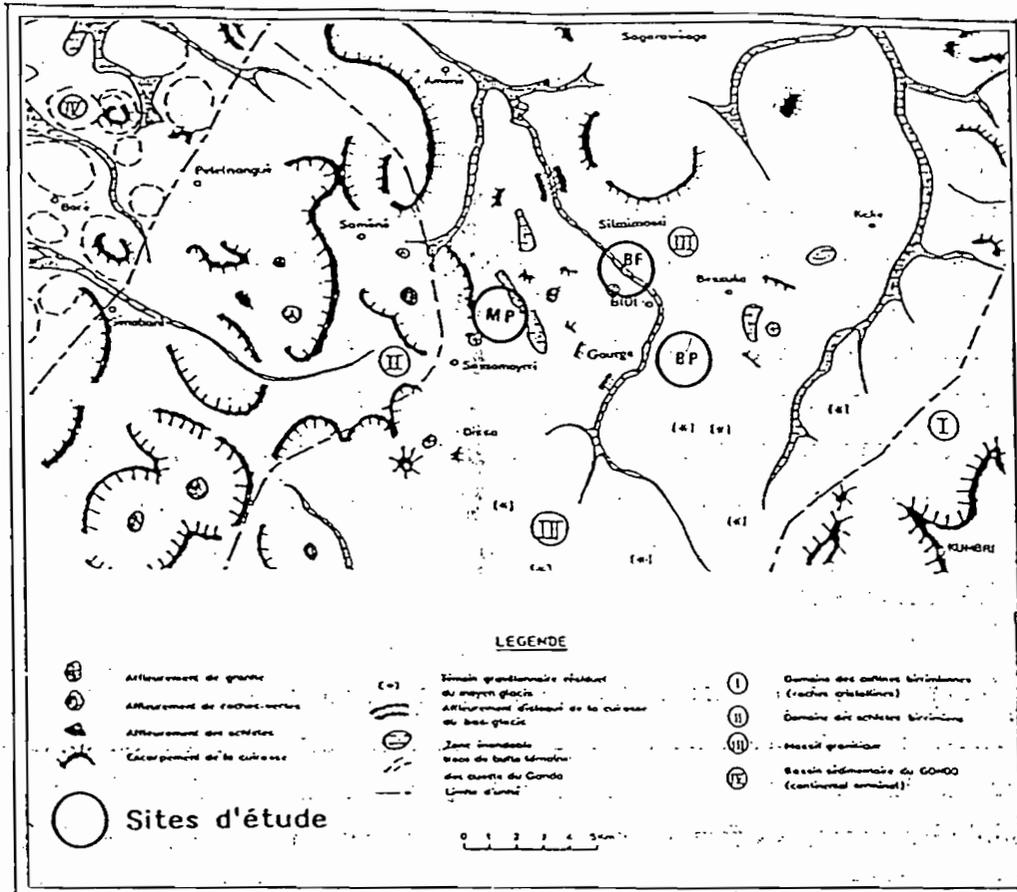


Figure I.5 : Carte géomorphologique de la région de BIDI (D'après GUILLET, 1992)

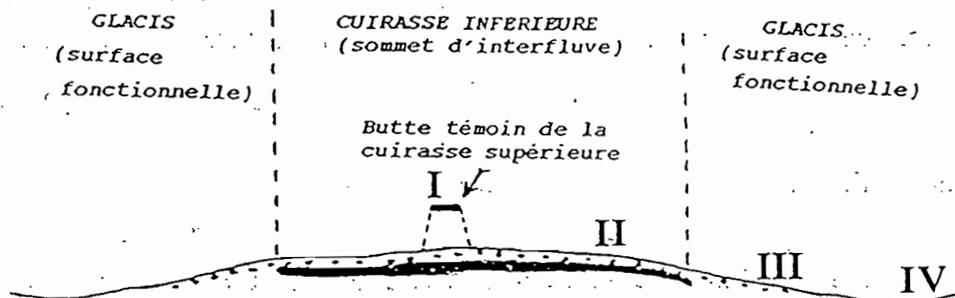


Figure I.6 : Coupe schématique du modélé en région granitique (D'après BOULET, 1968)

Lors des périodes chaudes et humides qui se sont succédées depuis l'ère tertiaire, il y a eu plusieurs phases de cuirassement. Les cuirasses, plus ou moins démantelées, s'organisent en plusieurs niveaux qui constituent l'armature du relief (figure I.5). D'après BOULET (1968), en zone granitique, le modelé est constitué généralement par une succession de cuirasses (figure I.6) :

- cuirasse supérieure (I) démantelée ne subsistant plus que localement sous forme de buttes témoins au sommet des interfluves actuels ;

- cuirasse inférieure (II) qui occupe le haut des interfluves en formant de vastes plateaux peu ondulés ;

- glacis (III) en continuité de pente avec la cuirasse inférieure dans laquelle ils sont entaillés. Les glacis correspondent à une surface fonctionnelle soumise aux agents pédogénétiques et peuvent porter des sols profonds. En bas des glacis, sont creusés les axes de drainage des eaux (IV) .

Dans la région étudiée, des dépôts éoliens ont ennoyé les versants. SERPANTIE *et al.* (1991) y décrivent 4 facettes du paysage. Sur une toposéquence, de 1 à 2 % de pente, ils distinguent d'amont en aval, les sommets des interfluves (II) où peuvent subsister des buttes cuirassées (I), les hauts et les bas versants (III) et les bas-fonds (IV). La végétation et les sols s'organisent en fonction de ces unités du paysage:

3. VEGETATION

La région de Bidi appartient au secteur phytogéographique subsahélien où interfèrent une végétation sahélienne et des espèces ubiquistes soudaniennes (GUINKO, 1985). SERPANTIE *et al.* (1991) montrent que la végétation se répartit selon les différentes unités du paysage qu'ils distinguent.

Aux sommets des interfluves et aux hauts versants, correspondent des steppes herbeuses et des fourrés de Combrétacées et de *Pterocarpus lucens*.

La végétation des bas versants présente les caractéristiques d'une savane arbustive à Combrétacées, *Guiera* et à *Piliostigma*.

Les bas-fonds sont occupés par une savane boisée de type soudanienne. Les principales espèces sont : *Adansonia digitata*, *Butyrospermum paradoxum subsp parkii*, *Lannea microcarpa*, *Parkia biglobosa* et *Tamarindus indica*.

Dans son ensemble, cette végétation subit le double effet de la sécheresse et de la pression humaine. Une comparaison de photographies aériennes montre que la végétation dense qui représentait, en 1952, 67 % de la superficie boisée, ne couvre plus que 22 % en 1984 (SERPANTIE *et al.*, 1988 et 1991).

4. SOLS

Les différentes unités de sols s'organisent en fonction du modelé et constituent des toposéquences bien définies.

Sur les sommets des interfluves et les hauts de versants, on trouve, associés aux cuirasses ferrugineuses, des sols gravillonnaires : lithosols et sols peu évolués d'érosion. Ce sont des sols peu épais où la cuirasse affleure par endroit.

Sur les bas de versants, on passe des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, sableux et bien drainés à mi-pente à des sols ferrugineux tropicaux lessivés à pseudogley de profondeur (à drainage réduit) en bas de pente. Ce sont des sols profonds (2 à 4 m), à texture sableuse à sablo-argileuse.

Plus en aval, dans les bas-fonds, les sols hydromorphes à pseudogley sont développés sur des matériaux colluvio-alluviaux. De texture argilo-limono-sableuse à argileuse, ils sont profonds.

5. MILIEU HUMAIN ET ACTIVITES AGRICOLES.

La population actuelle de Bidi compte environ 3500 habitants composés de Rimaïbés (captifs peuls affranchis) qui sont les autochtones, de Mossi et de Peuls. MERSADIER (1988) montre que cette population est restée à peu près stable depuis 1960.

La région fut d'abord une zone d'élevage peul transumant avant que l'agriculture ne vienne s'implanter avec l'arrivée des paysans mossi au début du 20^{ème} siècle (SERPANTIE *et al.*, 1988). A partir de ce moment, les populations, à subsistance agropastorale, ont utilisé les ressources du terroir de façon complémentaire ; les sommets des interfluves et les hauts de versants servent de parcours alors que les bas de versants et les bas-fonds sont cultivés. Ce type d'utilisation se perpétue de nos jours.

5.1. Système d'élevage

En 1984 le troupeau représentait 0,3 UBT (unité bétail tropical) par habitant. Depuis cette date, le cheptel, composé de bovins, d'ovins et de caprins, s'est accru ; le cheptel caprin, en particulier, a été multiplié par 3 entre 1984 et 1987.

L'élevage est de type sédentaire. Pendant la saison des pluies, les animaux sont gardés et se déplacent dans des couloirs jusqu'au lieu de pâture. En saison sèche, par contre, les petits ruminants (caprins et ovins) sont laissés en divagation dans une auréole de 2 km environ autour des habitations. Il s'en suit une très forte pression sur ce qui reste comme végétation dans cette zone.

Les résidus de récoltes sont exportés des champs pour assurer l'affouragement pendant les périodes chaudes. Cette pratique d'exportation des résidus végétaux qui concerne surtout les champs de village et des bas-fonds, s'étend de plus en plus à tout le terroir avec la facilité offerte par le transport à traction animale.

5.2. Système cultural

A l'instar du reste du Yatenga, le système cultural est consommateur d'espace (MARCHAL, 1977 et 1983 ; BILLAZ et DIAWARA, 1983 ; SERPANTIE *et al.*, 1988 et DUGUE, 1989). SERPANTIE *et al.* (1991) montrent qu'entre 1952 et 1984, la superficie cultivée est passée de 14 à 34 % de la superficie cultivable. Alors que pendant cette période la population est restée à peu près stable. En fait la surface cultivée par habitant a presque triplé (de 0,3 à 0,8 ha).

5.2.1. Cultures et successions culturales

Le nord du Yatenga se caractérise par un faible éventail de cultures en raison des contraintes pédo-climatiques. Le mil (*Pennisetum typhoides*), plante rustique, est la principale culture. Le sorgho (*Sorghum bicolor*) vient ensuite mais reste limité uniquement au bas-fond où il a remplacé le coton. Secondairement l'arachide (*Arachis hipogea*) et les pois de terre (*Voandzea subterranea*) sont cultivés.

D'une façon générale, le mil et le sorgho sont en monoculture plus ou moins continue. Le niébé (*Vigna indiculata*) leur est quelques fois associé. La jachère, de plus en plus rare surtout dans le domaine habité, est souvent de courte durée. A l'écart des zones habitées, elle peut durer de 10 à 15 ans.

5.2.2. Pratiques culturales

L'agriculture paysanne comporte généralement les opérations culturales suivantes : préparation des champs à l'approche des pluies ; semis dès les premières pluies ; façons culturales constituées essentiellement de deux ou trois sarclages manuels et enfin la récolte. Dans les champs de case où on apporte de la poudrette de fumier, celle-ci est déposée en petits tas avant d'être incorporée au sol lors du premier sarclage. L'apparition de la culture attelée et la sécheresse des deux dernières décennies, ont entraîné de profonds changements dans les pratiques culturales.

5.2.2.1. Préparation du sol

Pour une première année de mise en culture, la préparation du sol commence par le défrichement manuel de la savane. Seuls les arbres sont épargnés. La végétation abattue est mise en andains qui sont brûlés à l'approche de la saison des pluies. L'enlèvement des résidus de végétaux (souches notamment) et de rejets d'arbustes, suivi ou non du brûlis, constitue par contre, le mode de préparation des parcelles déjà en culture.

Le semis vient après cette opération de nettoyage dès les premières pluies. Mais dans certaines exploitations, il est précédé par un travail du sol qui consiste en un labour réalisé par une charrue attelée à traction animale après les premières pluies. Le sol est ameubli et retourné sur les 10 à 15 premiers centimètres. Cette pratique concerne uniquement les sols de versant

Pour lutter contre l'érosion, les ruissellements, et favoriser l'infiltration, certains paysans aménagent les sols de versant pendant la saison sèche en construisant des diguettes antiérosives suivant les courbes de niveaux.

5.2.2.2. Fumure

La fumure est essentiellement organique et concerne uniquement les champs de versants.

Dans l'aire des habitations, les champs sont généralement fumés avec des déchets organiques de qualité et de composition très variables. Ils sont généralement composés de déjections de petits ruminants, de fientes de volaille, de balayures et de déchets de cuisines. Leur disponibilité est relativement limitée si bien que les apports sont faits par portions de terrain une année sur deux ou trois.

Dans certains cas, de plus en plus rares à cause de la sécheresse, il existe des contrats de fumure entre agriculteur et éleveur pendant la saison sèche. Le bétail est gardé la nuit sur les champs à fumer où les résidus de récolte sont laissés sur place. Dans ces conditions, les apports organiques composés de fèces et de résidus végétaux plus ou moins déchiquetés, peuvent être importants (MILLEVILLE, 1982).

Dans les zones plus éloignées des habitations, la fumure n'est généralement pas pratiquée. Mais pour les exploitations disposant de moyens de transport à traction animale, elle peut concerner tous les champs.

5.2.2.3. Façons culturales

Deux à trois sarclages constituent l'essentiel des façons culturales. Le sarclage consiste en un grattage manuel de la surface (les 5 à 10 premiers cm) du sol à l'aide d'une houe (ou daba). Il a pour but non seulement de détruire les adventices mais aussi d'ameublir la couche superficielle, qui a tendance à former des croûtes, afin de faciliter l'infiltration (CASENAVE et VALENTIN, 1988).

En conclusion, on retiendra que la quantité et la qualité des pratiques culturales, qu'il s'agisse de la préparation du sol, de la fumure ou des travaux d'entretien, décroissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne des habitations. Par ailleurs, il n'y a pas de calendrier cultural bien établi. Ce sont les premières et les dernières averses qui déterminent les temps de travaux et les dates sont très variables d'une année à l'autre.

5.2.3. Systèmes de culture

Un système de culture est défini "*pour une surface de terrain traitée de manière homogène, par les cultures avec leur ordre de succession et les itinéraires techniques*" (SEBILLOTTE, 1982).

Dans le milieu étudié, on reconnaît deux grands groupes de systèmes de culture basés chacun sur une monoculture : les systèmes de culture de versant et ceux de bas-fond où les plantes cultivées sont respectivement le mil et le sorgho. Sur les versants, les systèmes de culture se distinguent par la présence ou l'absence de la fumure organique, du labour et de la rotation culture/jachère. Par contre, dans les bas-fonds où la culture se fait sans labour ni fumure organique, c'est la rotation culture/jachère qui constitue le principal critère de différenciation.

6. CONCLUSION

Le milieu physique se caractérise par :

- un climat chaud et sec avec une pluviométrie, très variable d'une année à l'autre et irrégulièrement répartie à l'intérieur d'une même année ;
- un modelé faiblement ondulé dont les unités de paysage s'organisent le long d'une pente de 1 à 3 % ;
- des sols de plus en plus profonds et riches en éléments fins portant, avant défrichement, une végétation de plus en plus arborée, d'amont en aval des toposéquences.

L'agriculture et l'élevage sont les principales activités d'une population aux pratiques agricoles consommatrices d'espace. L'utilisation des ressources naturelles est faite selon ces deux activités.

Le chapitre suivant présentera les caractères des principaux types de sols correspondant à chacune des trois situations d'étude et ceux des principaux systèmes de culture qui y sont pratiqués.

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES DES SITUATIONS ETUDIEES

L'étude porte sur les trois types de situations topographiques dont les principaux sols, décrits au paragraphe 1 du présent chapitre, sont : un sol ferrugineux tropical peu lessivé sur sables éoliens en mi-pente (MP) ; un sol ferrugineux tropical lessivé à hydromorphie de profondeur en bas de pente (BP) et un sol hydromorphe à pseudogley sur matériau colluvio-alluvial dans le bas-fond (BF). A ces trois catégories de sols, sont associés différents types de végétation et de systèmes de culture dont les caractéristiques sont également présentés dans ce chapitre (paragraphe 2).

1. CARACTERISTIQUES DES SOLS ETUDIES

1.1. Sol ferrugineux tropical peu lessivé sur sables éoliens de mi-pente (MP)

La pente est de 1 % environ. Les caractères morphologiques et physico-chimiques d'un profil sous jachère arbustive sont décrits ci-après.

1.1.1. Caractères morphologiques

La surface du sol est couverte à 40 % environ par une strate arbustive sous laquelle se trouve un tapis herbacé qui engendre une sorte de mulch recouvrant plus de 50 % du sol. Le sol est observé à l'état sec.

0 - 10 cm : A11

Couleur jaune rougeâtre (7.5YR 6/6). Texture sableuse fine. Structure massive à tendance litée. Cohésion faible. Porosité intersticielle fine importante, présence de pores tubulaires (0,1 à 2 mm de diamètre) discontinus. Racines fines très abondantes. Limite irrégulière mais distincte.

10 - 50 cm : A12

Brun foncé (10YR 4/4) plus clair vers le bas. Texture sableuse fine. Structure massive à tendance prismatique large avec des débits à face mamelonnée. Cohésion moyenne à faible. La porosité d'ensemble est voisine de la précédente mais la porosité tubulaire est plus grossière, plus importante et souvent continue. Racines abondantes (de quelques dixièmes de mm à 5 mm de diamètre). Limite irrégulière mais distincte.

50 - 80 cm : A/B

Couleur brun clair (7.5YR 5/6) à brun foncé (7.5YR 4/6). Texture sableuse fine à sablo-argileuse avec présence de sable grossier. Structure assez mal développée à tendance prismatique (les éléments structuraux ont 7 à 10 cm d'épaisseur). Cohésion faible à moyenne. La porosité d'ensemble est voisine de la précédente mais la porosité tubulaire est plus grossière, plus importante et souvent continue. Racines abondantes (de quelques dixièmes de mm à 5 mm de diamètre). Limite irrégulière peu distincte.

80 - 120 cm : B

Rouge jaunâtre (5YR 5/8). Texture sableuse à sablo-argileuse, encore plus grossière que précédemment. Présence de graviers ferrugineux. Structure assez mal développée à tendance prismatique (les éléments structuraux ont 7 à 10 cm d'épaisseur). Cohésion faible à moyenne. La porosité est semblable mais inférieure à celle de l'horizon sus-jacent. Les racines aussi sont moins nombreuses mais plus grosses (0,2 à 1 cm de diamètre).

1.1.2. Caractères analytiques

Les données sont regroupées dans le tableau II.1.

Dans tout le profil, les teneurs en sable sont supérieures à 70 % avec une prédominance des sables fins surtout dans l'horizon de surface. La fraction argileuse augmente progressivement de 5,8 % en surface à 18,5 % en profondeur. L'analyse

minéralogique montre que cette fraction est essentiellement constituée de kaolinite et quartz. Les teneurs en limons par contre, sont peu variables (6,4 à 11,7).

Le sol est pauvre en carbone organique et en azote totaux. Les teneurs en carbone organique total varient entre 0,42 et 0,22 % contre 0,38 et 0,23 ‰ pour l'azote total

Le complexe adsorbant se caractérise par une faible capacité d'échange cationique (3,76 à 2,01 cmol.kg⁻¹) et une somme des cations échangeables dont le Ca²⁺ constitue plus de 50 %, également faible (2,11 à 1,55 cmol.kg⁻¹) ; il est peu à moyennement désaturé (60 à 80 %). Le pH eau diminue avec la profondeur (6,0 à 5,5) mais reste moyennement acide dans l'ensemble du profil. Les teneurs en phosphore sont faibles ; le P₂O₅ assimilable varie de 10 mg/kg de sol en surface à 6,5 mg/kg de sol en profondeur.

Tableau II.1 : Caractères analytiques du sol ferrugineux tropical peu lessivé sur dépôts sableux éoliens (profil sous jachère arbustive)

Caractères physiques et chimiques	Profondeur en cm			
	0-10	10-50	50-80	80-120
Argile (%)	5,8	7,8	14,5	18,5
Limon fin (%)	4,2	4,3	1,5	1,5
Limon grossier %	2,1	7,4	4,9	5,5
Sable fin (%)	64,3	48,1	45,7	44,9
Sable grossier %	23,6	32,5	33,3	29,8
C organique total (%)	0,42	0,35	0,22	
N total (‰)	0,38	0,26	0,23	
C/N	11,1	13,5	9,6	
Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	1,27	0,94	1,23	1,24
Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,56	0,43	0,74	0,69
K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,26	0,18	0,13	0,13
Somme des bases échangeables S (cmol.kg ⁻¹)	2,09	1,55	2,11	2,06
Capacité d'échange cationique CEC (cmol.kg ⁻¹)	3,0	2,21	2,67	3,43
Taux de saturation V = 100S/CEC (%)	70	70	79	60
pH eau	6,0	5,8	5,7	5,5
P ₂ O ₅ total (mg/kg de sol)	180	200	260	
P ₂ O ₅ Assimilable DABIN (mg/kg de sol)	10,1	10,1	6,5	

1.1.3. Conclusion

Il s'agit donc d'un sol ferrugineux modal dont la texture sableuse à la partie supérieure, s'enrichit progressivement en argile avec la profondeur. Il est pauvre en matière organique et en phosphore, à faible capacité d'échange moyennement à bien saturée. La profondeur, limitée par un niveau cuirassé, varie de 50 cm à plus de 2 m de l'amont vers l'aval.

1.2. Sol ferrugineux tropical lessivé de bas de pente (BP)

Le sol de bas de versant se trouve sur une pente moyenne de 1,5 %. Les caractères morphologiques, physiques et chimiques d'un profil sous jachère herbacée de 5 ans sont décrits ci-après.

1.2.1. Caractères morphologiques

La surface du sol est recouverte à plus de 50 % par un tapis herbacé avec quelques arbustes. Le sol est décrit à l'état sec.

0 - 10 cm : A1

Couleur brun jaunâtre (10YR 5/4). Texture sablo-argileuse. Structure fragmentaire nette polyédrique subangulaire ; éléments structuraux de 2 à 5 cm. Cohésion faible. Porosité importante, constituée d'une porosité "mie de pain" très fine et d'une porosité tubulaire continue de 1 à 3 mm de diamètre. Activité biologique développée (oeufs et cadavres d'insectes, termites). Horizon à chevelu racinaire dense. Limite irrégulière mais distincte.

10 - 35 cm : A2:

Couleur brun jaunâtre (10YR 5/4) en sec. Texture sablo-argileuse. Structure massive peu fissurée à tendance prismatique. Cohésion moyenne à forte. Porosité importante, constituée d'une porosité "mie de pain" très fine et d'une porosité tubulaire continue de 1 à 3 mm de diamètre. Activité biologique très développée (oeufs d'insectes, termites). Nombreuses racines de quelques dixièmes de mm à 2 mm de diamètre (en majorité des racines ligneuses). Limite irrégulière mais distincte.

35 - 65 cm : B1:

Couleur jaune rougeâtre (7.5YR 6/6). Texture argilo-sableuse. Structure massive à fragmentaire peu nette. Cohésion moyenne à faible. Porosité importante, constituée d'une porosité "mie de pain" très fine et d'une porosité tubulaire continue de 1 à 3 mm de diamètre. Activité biologique développée comme précédemment. Nombreuses racines de quelques dixièmes de mm à 2 mm de diamètre (en majorité des racines ligneuses), plus abondantes que dans l'horizon sus-jacent. Limite irrégulière mais distincte.

65 - 110 cm B2(g)

couleur jaune rougeâtre (7.5YR 7/8) à sec. Présence de taches rouille et jaunâtres, et de concrétions ferro-manganiques, plus abondantes surtout vers la profondeur (40 % environ de l'horizon). Texture argilo-sableuse avec du sable grossier. Structure massive.

1.2.2. Caractères analytiques

Le profil de texture (tableau II.2) montre une prédominance de la fraction sableuse qui atteint 67 % dans l'horizon A (0-35 cm) et 50 à 55 % dans l'horizon B (35-110 cm). L'argile présente, dans les deux horizons respectifs, à 12,0 % et 37 %, est constituée principalement de kaolinite. Les teneurs en limon varient de 20 % dans les 65 premiers centimètres à 13,7 % en profondeur.

Le sol est pauvre en matière organique. Les teneurs en carbone organique total diminuent de 0,30 en surface à 0,20 % en profondeur. Celles de l'azote total varient dans le même sens de 0,33 à 0,25 %.

La capacité d'échange cationique, est faible et augmente avec la profondeur. Elle passe de 2,47 cmol.kg⁻¹ à 5,86 cmol.kg⁻¹ dans l'horizon B. La somme des bases échangeables dont le Ca²⁺ représente plus de la moitié; est également faible et augmentée de 2,58 cmol.kg⁻¹ en surface à 3,81 cmol.kg⁻¹ en profondeur. Les taux de saturation sont moyens à forts.

Le pH est faiblement acide (6,2) en surface à moyennement acide en profondeur (5,5).

1.2.3. Conclusion

La différenciation du profil en horizon A lessivé de texture sablo-argileuse et en horizon B argilo-sableux avec des traces d'hydromorphie en profondeur et l'activité faunique (termites) très développée constituent les caractères marquants de ce sol. C'est un sol ferrugineux tropical lessivé hydromorphe, pauvre en matière organique et en phosphore, à faible capacité d'échange moyennement à fortement saturée.

Tableau II.2 : Caractères analytiques du sol ferrugineux tropical lessivé de bas de pente (profil sous jachère herbacée de 5 ans).

Caractères physiques et chimiques	Profondeur en cm			
	0-10	10-35	35-65	65-110
Argile (%)	12,0	20,9	35,0	36,5
Limon fin (%)	10,0	15,9	14,0	7,3
Limon grossier %	10,7	9,8	9,9	6,4
Sable fin (%)	46,7	37,0	28,3	33,3
Sable grossier %	20,6	16,4	12,8	16,5
C organique total (%)	0,30	0,34	0,22	
N total (‰)	0,33	0,31	0,20	
C/N	9,1	11,0	11,0	
Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	1,08	0,97	1,26	2,32
Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,35	0,72	0,92	1,40
K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,31	0,20	0,20	0,09
Somme des bases échangeables S (cmol.kg ⁻¹)	1,74	1,89	2,38	3,81
Capacité d'échange cationique CEC (cmol.kg ⁻¹)	2,47	3,15	4,53	5,86
Taux de saturation V = 100.S/CEC (%)	70	60	53	65
pH eau	6,2	5,5	5,4	5,8
P ₂ O ₅ total (mg/kg de sol)	230	270	290	
P ₂ O ₅ Assimilable DABIN (mg/kg de sol)	9,0	8,5	4,5	

1.3. Sol hydromorphe à pseudogley sur matériau colluvio-alluvial de bas-fond (BF).

Le sol est situé dans la partie centrale du bas-fond à pente longitudinale inférieure à 1 %. Un profil décrit sous forêt galerie dégradée, à l'état sec, présente les caractéristiques ci-après.

1.3.1. Caractères morphologiques

La surface du sol est recouverte, à 20 % environ, de débris végétaux (brindilles, morceaux de tiges et de bois etc...) tombés des arbres ou déposés par les eaux d'inondation temporaire.

0 - 10 cm : A1

Brun jaunâtre (10YR 5/6). Texture limono-argilo-sableuse. Structure massive à tendance litée ; on note cependant la présence, par endroits, de petits agrégats de 0,5 à 3 mm. Porosité d'ensemble très importante constituée d'une porosité vésiculaire "mie de pain" et d'une porosité tubulaire à nombreux pores de 1 mm à 2 cm de diamètre. Racines assez nombreuses. Présence de débris organiques mal décomposés. Activité biologique très développée (insectes morts, termites). Limite nette mais irrégulière.

10 - 35 cm : A1g

Brun jaunâtre (10YR 5/4). Présence de taches rouille. Texture argilo-sableuse. Structure polyédrique subangulaire développée. Eléments structuraux de 2 à 5 cm d'épaisseur. Cohésion moyenne à faible. Porosité très importante avec une porosité vésiculaire plus faible que celle de l'horizon précédent. Très nombreuses racines de 1 à 3 mm de diamètre et quelques racines de 0,5 à 1 cm de diamètre. Présence de débris végétaux plus ou moins décomposés. Activité biologique très développée. Limite régulière mais distincte.

35 - 65 cm : B1g

Couleur hétérogène, brun pâle (10YR 6/3) dominant, à brun jaunâtre clair (10YR 5/4). Taches rouille de plus en plus abondantes avec la profondeur. Texture argilo-sableuse. Structure polyédrique moyennement développée; éléments structuraux de 5 à 7cm d'épaisseur. Cohésion moyenne à forte. Porosité moyenne. Activité biologique développée. Nombreuses racines de 1 à 3 mm de diamètre et quelques racines de 0,5 à 1 cm de diamètre. Limite distincte mais irrégulière.

65 - 120 cm : B2g

Brun jaunâtre (10YR 5/6). Texture argilo-sableuse. Présence de concrétions ferrugineuses et de taches noirâtres et rouille, plus abondantes vers la base. Structure massive à tendance polyédrique mal développée. Cohésion forte. Porosité moyenne à forte. Peu de racines. Activité biologique modérée.

1.3.2. Caractères analytiques

Les données sont regroupées dans le tableau II.3.

L'analyse granulométrique montre que les teneurs en argile, limon et sable, ne présentent pas de très grandes différences d'un horizon à l'autre. Mais les taux de sable grossier augmentent avec la profondeur : ils passent de 0,74 % en surface à 23,4 %.

Tableau II.3 : Caractéristiques analytiques du sol hydromorphe peu humifère à pseudogley sur matériaux colluvio-alluviaux de bas-fond (profil sous forêt galerie dégradée)

Caractères physiques et chimiques	Profondeur en cm			
	0-10	10-35	35-65	65-120
Argile (%)	22,3	21,5	30,5	27,3
Limon fin (%)	22,6	14,0	17,5	11,0
Limon grossier %	11,5	11,1	11,0	10,4
Sable fin (%)	43,0	40,4	28,9	28,0
Sable grossier %	0,7	13,0	12,0	23,4
C organique total (%)	1,45	1,25	0,84	
N total (‰)	1,20	1,01	0,70	
C/N	13,1	12,4	12,0	
Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	3,28	2,68	2,26	1,85
Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	1,33	1,56	1,16	0,83
K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,53	0,30	0,29	0,12
Somme des bases échangeables S (cmol.kg ⁻¹)	5,12	4,54	3,71	2,80
Capacité d'échange cationique CEC (cmol.kg ⁻¹)	6,83	6,22	5,46	4,86
Taux de saturation V = 100.S/CEC (%)	55	73	68	58
pH eau	6,3	6,2	6,0	5,5
P ₂ O ₅ total (mg/kg de sol)	570	730	480	
P ₂ O ₅ Assimilable DABIN (mg/kg de sol)	35,5	44,0	26,0	

Le profil est moyennement riche en matière organique. Les teneurs en carbone organique total diminuent assez rapidement de 1,45 % en surface à 0,84 % dans l'horizon 35-65 cm. Celles de l'azote total vont de 1,20 à 0,70 ‰. Le C/N correspondant varie entre 13,1 et 12.

Le complexe adsorbant se caractérise par un faible capacité d'échange cationique qui diminue avec la profondeur (6,83 à 4,86 cmol.kg⁻¹). La somme des bases échangeables, également faible varie dans le même sens (5,12 à 2,80 cmol.kg⁻¹). Le taux de saturation est fort à moyen. Le pH est moyennement acide (6,0 à 5,5). Les teneurs en phosphore, également faibles, montrent un ventre dans l'horizon 10-35 cm (730 et 44 mg/kg respectivement pour P₂O₅ total et P₂O₅ assimilable).

1.3.3. Conclusion

Le sol se caractérise par sa texture argilo-limoneuse à argilo-limono-sableuse et par l'apparition des taches d'oxydo-réduction dès les 10 premiers centimètres. Il s'agit d'un sol hydromorphe à pseudogley sur matériau colluvio-alluvial, moyennement riche en matière organique, à faible capacité d'échange moyennement à fortement saturée.

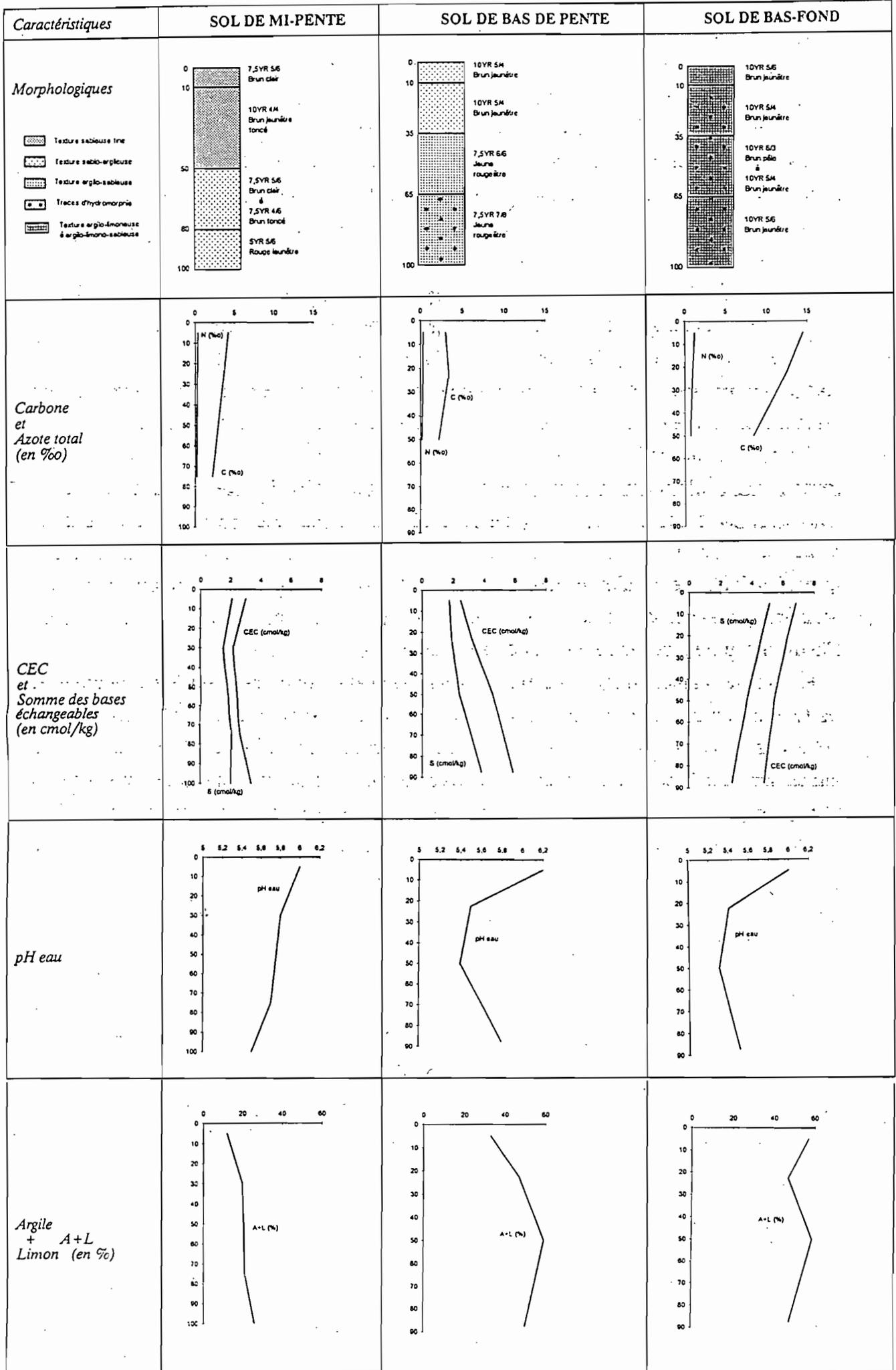
1.4. Conclusion

Les caractéristiques des trois sols étudiés sont résumées sur la figure II.1.

Sur le plan morphologique, ils se distinguent par la couleur, la texture et les marques d'oxydo-réduction reflétant les conditions de drainage. Le sol de mi-pente, bien drainant, a une texture sableuse en surface à sablo-argileuse en profondeur avec une couleur allant du brun plus ou moins clair au rouge jaunâtre. Celui du bas-fond, par contre, de couleur brun jaunâtre, a une texture argilo-limono-sableuse à argilo-limoneuse avec des traces d'hydromorphie dès les 10 premiers cm. Le sol de bas de pente, brun jaunâtre à brun rougeâtre, présente dans ses 35 premiers centimètres, des caractéristiques texturales proches de celles du sol de mi-pente alors que pour ses horizons sous-jacents, il se rapproche plus du sol de bas-fond avec des traces d'hydromorphie à partir de 65 cm de profondeur.

Sur le plan chimique, la capacité d'échange cationique, les bases échangeables et les teneurs en phosphore total augmentent du sol de mi-pente à celui de bas-fond. Le pH est assez comparable dans les trois sols. Les teneurs en carbone organique et azote totaux sont également nettement plus élevées dans le sol de bas-fond que dans les sols de versant ; le sol de mi-pente a des teneurs supérieures à celles du sol de bas de pente.

Figure II.1 Résumé des caractéristiques des trois sols étudiés



2. CARACTERISTIQUES DES SYSTEMES DE CULTURE ETUDIES.

2.1. Systèmes de culture sur sol de mi-pente (MP)

Le terrain étudié est situé à 3 km environ des habitations. Il est par conséquent travaillé selon les systèmes de culture de brousse caractérisés par l'instauration d'une jachère après 10 à 15 années de culture de mil. Trois situations comprenant deux parcelles en culture continue de mil et une parcelle sous jachère arbustive, ont été choisies. Les deux parcelles cultivées, de 0,6 ha chacune, appartiennent à un dispositif expérimental mis en place depuis 1984 (SERPANTIE *et al.*, 1988) pour étudier les effets de l'aménagement antiérosif et des systèmes de culture avec labour, sur les rendements du mil et sur les caractéristiques hydrodynamiques du sol.

Le système MP1 est pris en condition non cultivée. Il s'agit d'une jachère de plus de 15 ans. Le sol est recouvert presque à 40 % par une végétation arbustive de 2,5 m de haut en moyenne composée de quelques *Piliostigma reticulatum* et *Combretum nigricans* au milieu des *Guiera senegalensis*. Les pieds des arbustes sont assez dégagés permettant ainsi le développement d'un tapis herbacé qui recouvre de manière assez homogène plus de 50 % le sol. Les espèces les plus rencontrées sont: *Schoenfeldia gracilis*, *Brachiaria disticophyla*, *Andropogon pseudapricus*, *Borreria radiata*, *Zornia glochidiata*, *Cenchrus biflorus* et *Echinochloa colona*. L'herbe morte constitue une sorte de mulch de quelques millimètres d'épaisseur à la surface du sol.

Le système de culture MP2 correspond à la parcelle témoin de l'essai agronomique. Elle ne comporte pas d'aménagement antiérosif et est cultivée en mil chaque année depuis 6 ans, sans labour mais avec un apport de 25 kg/ha d'engrais NPK (15-20-15) au cours d'un premier sarclage. Un second sarclage est réalisé pendant la phase d'épiaison.

Le système de culture MP3 correspond à une parcelle aménagée comportant des diguettes antiérosives isohypses en cordons pierreux. Cet aménagement permet de réduire le ruissellement et donc d'augmenter l'infiltration de 40 % par rapport au témoin (SERPANTIE et LAMACHERE, 1988). En plus des traitements appliqués à la parcelle précédente, elle est labourée chaque année à la charrue à traction animale.

Dans les deux situations cultivées, les résidus de récolte restent sur les parcelles à la merci des animaux pendant la saison sèche. A l'approche de la saison des pluies, les gros morceaux de tiges et les souches sont enlevés au cours du nettoyage précédant le semis ou le labour.

2.2. Systèmes de culture sur le sol de Bas de Pente (BP)

Le terrain se trouve dans l'aire habitée. De ce fait, la permanence des cultures depuis l'installation du village, constitue un des caractères majeurs par rapport aux champs plus éloignés (MARCHAL, 1983). A cela, s'ajoute la pratique de la fumure organique et les travaux aratoires dont la quantité et la qualité décroissent avec l'éloignement du village. La jachère existe mais elle est de très courte durée et est fréquemment en partie reprise pour des cultures secondaires ou sert de parcours. Trois systèmes de culture ont été retenus.

Le système de culture BP1 correspond à une jeune jachère de 5 à 6 ans qui vient après une culture continue de mil de plus de 15 ans sans labour ni fumure. La végétation est à dominante herbacée à laquelle s'ajoute une strate arbustive composée de *Piliostigma reticulatum*, *Guiera senegalensis*. Les espèces herbacées sont *Schoenfeldia gracilis*, *Andropogon pseudapricus*, *Borreria radiata*, *Zornia glochidiata*, *Cenchrus biflorus*, *Echinochloa colona* et *Brachiaria ramosa*.

Le système de culture BP2 se caractérise par une culture continue de mil depuis plus de 40 ans. Le niébé (*Vigna indicalata*) y est parfois associé. Il est caractéristique du système cultural traditionnel de concession (MARCHAL, 1983) avec une fumure organique une année sur deux ou trois. Cette dernière, composée de fumier de petits ruminants, de fientes de volaille et de déchets de cuisine, est incorporée au sol lors du premier sarclage. Les travaux d'entretien consistent en deux ou trois sarclages manuels.

Le système de culture BP3 correspond à une culture de mil poursuivie depuis plus de 40 ans, associé parfois au niébé. Ces 15 dernières années les techniques culturales ont été modifiées d'une part par un important apport annuel de résidus de récolte et de fumier (déjection du bétail gardé sur le champ pendant la saison sèche) et d'autre part par un labour à la charrue à traction animale avant les semis. MILLEVILLE (1982) estime que la quantité de fumier apportée par un tel parcage de troupeaux peut atteindre 10 tonnes de matière sèche/ha/an. Trois ou quatre sarclages sont réalisés entre le semis et la récolte. Ce système représente un exemple de culture intensive réalisable dans la région.

2.3. Systèmes de culture sur sol de Bas-Fond (BF).

La pratique de la culture continue de sorgho dans les bas-fonds date d'une trentaine d'années. Le système cultural se caractérise essentiellement par la rotation culture/jachère. Aussi avons nous retenu un couple de parcelles cultivée et non cultivée.

La parcelle BF1 est sous végétation arborée et arbustive . Les arbres dont la taille varie entre 15 et 25 m de haut sont des *Adansonia digitata*, et des *Mitragyna inermis*. Pour la strate arbustive, la hauteur moyenne est de 4 m et les espèces sont *Combretum nigricans* (les plus nombreux), *Piliostigma reticulatum*, *Acacia pennata* et *Diospiros mespiliformis*. Le tapis herbacé est pratiquement inexistant. La végétation ligneuse recouvrant l'ensemble de la surface, représente les derniers vestiges d'une forêt galerie dégradée, dans la région. De mémoire d'homme cette parcelle n'avait jamais été cultivée. La surface du sol est, par contre, recouverte à 20 % environ, de débris végétaux mal décomposés (brindilles, morceaux de tiges et bois, etc...), tombés des arbres ou déposés par les eaux d'inondation.

Le système de culture BF2 correspond à une parcelle cultivée en sorgho depuis plus de 30 ans sans fumure ni labour. L'exécution des opérations de sarclages (1 à 2 par saison de culture) est souvent médiocre et très hétérogène. Ceci se traduit par l'omniprésence de l'herbe en certains endroits.

2.4. Critères du choix des systèmes de culture.

La durée de la mise en culture est l'un des principaux facteurs qui déterminent les effets des systèmes de culture (FAUCK *et al.*, 1969 ; BOYER, 1970 ; SIBAND, 1972 et 1977 ; FELLER et MILLEVILLE, 1977 ; LADD *et al.*, 1986 et BOIFFIN *et al.*, 1989). Une enquête préliminaire a permis de ne retenir que les situations pour lesquelles on dispose de suffisamment de renseignements, en particulier sur les principales opérations culturales qui se sont succédées durant les dix dernières années au moins.

De plus, pour pouvoir comparer les différents systèmes de culture sur un même site, il fallait s'assurer que les sols présentent des caractéristiques semblables. La texture et le développement du profil sur les 100 premiers centimètres ont été utilisés comme critères d'appréciation. La distance entre les différentes parcelles étudiées, dans chaque situation, est inférieure à 100 m.

2.5. Conclusion

Les principales caractéristiques des différents systèmes de culture sont résumées dans le tableau II.4.

Tableau-II.4 : Caractéristiques des systèmes de culture étudiés

<i>Pratiques culturales</i>	MI-PENTE	BAS DE PENTE	BAS-FOND
<i>Jachère</i> ou <i>Savane</i>	MP1 : Jachère arbustive de plus de 15 ans.	BP1 : Jachère herbacée de 5 à 6 ans.	BF1 : Forêt galerie dégradée
<i>Sans Labour</i> sans Fumure organique	MP2 : Culture continue de mil pendant 6 ans avec apport annuel de 25 kg de NPK / ha dans une parcelle non aménagée.		BF2 : Culture de sorgho depuis plus de 30 ans avec, au cours des 10 dernières années, exportation des résidus de récolte.
<i>Sans Labour</i> avec Fumure organique		BP2 : Culture de mil depuis plus de 40 ans avec léger apport de fumier (une fois tous les 2 à 3 ans)	
<i>Labour</i> sans Fumure organique	MP3 : Culture continue de mil pendant 6 ans avec apport annuel de 25 kg de NPK / ha et labour annuel avant semis dans une parcelle aménagée avec des diguettes anti-érosives.		
<i>Labour</i> avec Fumure organique		BP3 : Culture de mil depuis plus de 40 ans et, depuis au moins 15 ans, apport annuel de fumier et résidus de récolte avec labour annuel	

Les situations sous culture se distinguent par la pratique ou non du labour et/ou de la fumure organique. Elles peuvent être regroupées en trois catégories en fonction du degré d'intensification : les systèmes MP2 et BF2 n'utilisant ni labour ni fumure organique sont des systèmes de culture manuels à faible intensification ; le système BP3, qui combine travail du sol avant le semis et forte fumure organique, peut être considéré comme un système cultural intensifié (PIERI, 1989) ; les autres, utilisant plus ou moins la fumure organique (BP2) ou combinant une faible fumure minérale et le travail du sol (MP3), sont intermédiaires.

Les caractéristiques des jachères sont fonction de l'intensité d'exploitation du milieu : les bas-fonds dont la mise en culture permanente est relativement récente (SERPANTIE, 1988), comportent encore de vieilles jachères arborées (BF1) ; dans les terrains éloignés de l'aire des habitations, on rencontre encore des jachères arbustives et herbacées ayant en moyenne 10 ans (MP1) ; enfin, dans le domaine habité, la jachère est rare et, quand elle existe, la végétation a du mal à s'installer à cause de la pression humaine et animale (BP1).

L'étude de l'influence de la mise en culture sur l'évolution des sols se fait habituellement en comparant leurs caractéristiques sous culture avec celles des sols sous végétation naturelle (FAUCK *et al.*, 1969 ; SIBAND, 1972 ; SOURABIE, 1979 ; PALLO, 1982 ; MOREAU, 1984 ; DJEGUI, 1992). La présence de tels témoins est assez rare dans cette zone où la végétation subit à la fois, les contraintes climatiques et la pression humaine ; mais nous pouvons, dans chacune des trois situations topographiques, comparer les effets des différents systèmes choisis pour un même type de sol.

Deuxième partie

**MODIFICATIONS DES CARACTERES DES SOLS
PAR LES SYSTEMES DE CULTURE**

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

Les cultures et surtout les pratiques culturales provoquent de profondes modifications des caractéristiques des sols. Certaines de ces modifications sont fugaces et réversibles, relevant des variations saisonnières (FAUCK *et al.*, 1969) alors que d'autres, dues aux effets cumulatifs des systèmes de culture, affectent d'une façon permanente ce que SEBILLOTTE *et al.* (1989) appellent "les mémoires des sols". Il est question ici de cette dernière catégorie de modifications qui concernent les caractères aussi bien morphologiques, physiques, chimiques que biologiques. L'évolution est appréciée à un moment donné, par une comparaison des caractères d'un même type de sol soumis à différentes conditions de culture (FAUCK *et al.*, 1969 ; SIBAND, 1972 et SEBILLOTTE, 1987).

L'objectif de cette partie est donc de caractériser l'état morphologique, physique, chimique et biologique des sols des 8 situations étudiées. Puis, pour chaque sol, une analyse comparative des résultats obtenus permettra d'apprécier l'influence des systèmes de culture sur les modifications de ses caractéristiques.

La caractérisation des sols est réalisée à partir de la description de terrain, de déterminations analytiques de laboratoire et de tests de minéralisation de matière organique. Un fractionnement physique est utilisé pour étudier la matière organique (carbone organique et azote totaux) dans différentes fractions granulométriques des sols.

Cette partie comporte trois chapitres.

Le chapitre III est consacré à l'étude des modifications morphologiques, physiques et chimiques des sols sur les 60 premiers centimètres en fonction des systèmes de culture. Les chapitres IV et V traitent respectivement de l'influence des systèmes de culture sur la matière organique (carbone organique et azote totaux) des fractions granulométriques et sur le pouvoir minéralisateur de l'horizon 0-10 cm des sols.

CHAPITRE III

INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LES CARACTERES MORPHOLOGIQUES, PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS

1. METHODOLOGIE

1.1 Délimitation d'une parcelle d'étude

Dans chacune des 8 situations, les observations et mesures ont porté sur une parcelle de 400 m² environ délimitée de la manière suivante :

- un profil type, établi sur une fosse pédologique de 1 à 1,2 m de profondeur, a été décrit dans chaque situation ;

- des sondages rapprochés à la tarière ont ensuite permis, par comparaison avec le profil décrit, la délimitation de la parcelle d'étude, relativement homogène (microtopographie, texture, couleur et développement du profil).

L'étude des transformations des sols se fait à deux niveaux : dans un premier temps on analyse les caractères morphologiques par la méthode des profils culturaux puis des échantillons sont prélevés pour une caractérisation physique et chimique des différents profils.

1.2. Caractérisation morphologique

La méthode de description est fondée sur celle utilisée habituellement en agronomie (HENIN *et al.*, 1969 et De BLIC, 1979) et sur celle, plus spécifique à la région, mise au point par CASENAVE et VALENTIN (1988) pour l'étude des états de surface.

Dans chaque situation, 3 profils sont décrits le long d'une diagonale de la parcelle d'étude. La description qui concerne les 60 premiers centimètres, a consisté à distinguer différents volumes de sol selon des critères de couleur, de texture, de structure, de compacité, de porosité et de présence de débris organiques.

1.3. Déterminations analytiques

Après chaque description, des échantillons sont prélevés dans les différents volumes identifiés pour des déterminations analytiques au laboratoire. Ces dernières

portent sur : la granulométrie, la matière organique, les bases échangeables et pH, le phosphore total et phosphore assimilable.

L'analyse granulométrique (à 5 fractions) est faite selon la méthode du Sédigraph (DELAUNE *et al.*, 1991), où les particules (argile et limon) de la fraction inférieure à 50 μm , séparée de la fraction grossière par tamisage humide, sont réparties suivant leur densité mesurée par rayonnement X. La fraction grossière, séchée à 105 °C, est tamisée pour séparer les sables des limons grossiers.

Le phosphore total et le phosphore assimilable sont respectivement dosés après attaque à l'acide perchlorique et selon la méthode OLSEN modifiée par DABIN (1967).

La matière organique est caractérisée par ses teneurs en carbone organique et azote totaux. Le carbone organique total est dosé par voie sèche à l'autoanalyseur CHN LECO. L'azote total est dosé par méthode KJELDAHL.

Les bases échangeables sont dosées selon la nouvelle norme internationale où l'extraction des cations se fait par agitation répétée de l'échantillon de sol dans une solution de BaCl_2 0,1 M au pH du sol.

1.4. Conclusion

La caractérisation morphologique, physique et chimique des sols utilise des méthodes bien connues en Science du Sol. Mais afin de pouvoir mettre en évidence des différences entre les systèmes de culture, il a fallu adopter un plan d'échantillonnage approprié qui prenne en compte la variabilité du milieu et l'hétérogénéité des sols. Cela a commencé, pour chaque sol considéré, avec le choix des situations (chapitre II). Puis, la prise en compte de la variabilité spatiale au niveau de chaque situation a conduit, dans un premier temps à la délimitation d'une parcelle relativement homogène (texture et développement du profil) et dans un second temps, à la multiplication du nombre d'observations et de déterminations (3 profils cultureux par parcelle).

La situation de référence pour chaque type de sol est la parcelle où il y a eu le moins d'interventions humaines. Il s'agit de la jachère arbustive de 15 ans (MP1) pour le sol de mi-pente, de la jachère herbacée de 5 ans (BP1) pour le sol de bas de pente et de la forêt galerie dégradée (BF1) pour le sol de bas-fond.

Les résultats présentés ci-après sont les moyennes des observations et analyses faites sur les trois profils cultureux effectués dans chaque parcelle.

2. INFLUENCE SUR LES CARACTERES MORPHOLOGIQUES DES SOLS

2.1. Sol de mi-pente

Sur la profondeur observée (60 cm), les modifications morphologiques s'observent surtout au niveau de l'horizon A. La figure III.1 représente les différents volumes identifiés dans ce dernier pour les trois situations. Leurs principales caractéristiques sont données dans le tableau III.1.

Sous jachère arbustive (fig. III.1.1) l'horizon A est divisé en deux volumes. Un volume A11 à chevelu racinaire dense, brun clair (7,5YR 6/6), 10 cm d'épaisseur, structure massive et litée. Le litage semble correspondre à plusieurs phases de dépôts sableux. Ces dépôts polygéniques (CASENAVE et VALENTIN, 1988) peuvent être attribués au piégeage, par la végétation, du sable érodé des zones nues. Le volume A11 est tapissé par une mince croûte d'érosion et/ou de ruissellement (A11C) à structure litée et constituée par l'alternance de bandes sableuses claires et de pellicules plasmiques sombres (plus nombreuses). Le volume A12 sous-jacent de couleur brun jaunâtre, est plus épais (20 cm) et a une structure massive peu fissurée à débit mamelonné.

Dans les profils sous culture MP2 et MP3, le volume A11 est remplacé par des volumes travaillés dont les caractéristiques sont fonction du système de culture. Le volume A12 a les mêmes caractéristiques que celui de la jachère MP1.

Pour le sol cultivé sans labour ni aménagement antiérosif MP2 (fig. III.1.2), la couche travaillée est constituée uniquement du volume sarclé ApS de 7 à 10 cm d'épaisseur. Il a une structure particulière à motteuse meuble et contient d'abondants débris végétaux (paille et racines d'adventices). Le volume ApS renferme des volumes ApC. Le volume ApC représente un ensemble discontinu de deux croûtes : une croûte de ruissellement et/ou d'érosion ayant des caractéristiques similaires à celles du volume A11C et une croûte de décantation de structure particulière constituée de sable trié.

Dans le sol cultivé avec labour et aménagement antiérosif MP3 (fig. III.1.3), la couche travaillée est plus épaisse (10 à 15 cm) et constituée de deux volumes bien distincts. Un volume ApS de 5 à 7 cm d'épaisseur dont les caractéristiques sont semblables à celles observées en MP2. Il est associé à des croûtes ApC. Le second volume ApL correspond à la couche labourée non reprise lors du sarclage ; de structure massive à motteuse à tendance litée, il est assez cohérent et est comparable à ApS pour les autres caractères. La différence entre MP2 et MP3 porte essentiellement sur l'existence du volume ApL dont le litage pourrait être attribué aux effets cumulatifs du labour.

Figure III.1 : Volumes structuraux dans l'horizon 0-30 cm des profils culturaux du sol de mi-pente.

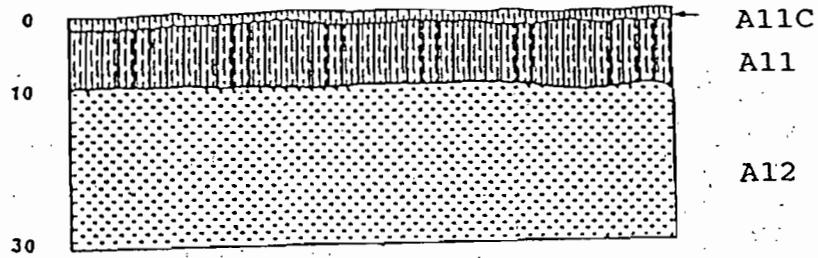


Figure III.1.1 : Profil sous jachère arbustive et herbacée (MP1)

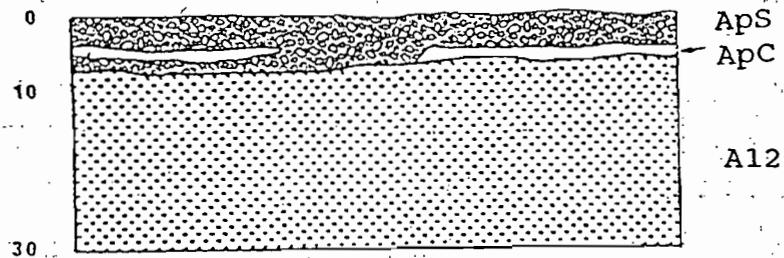


Figure III.1.2 : Profil cultural sous culture continue de mil sans labour en parcelle non aménagée (MP2)

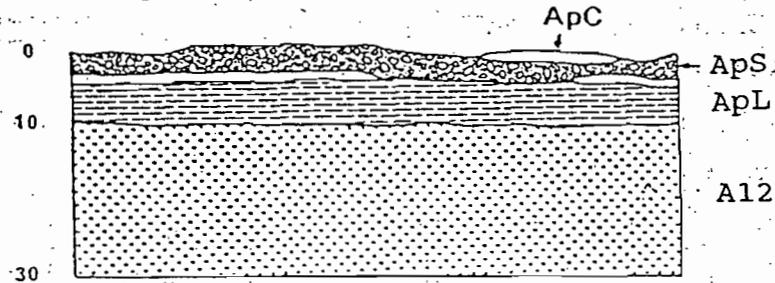


Figure III.1.3 : Profil cultural sous culture continue de mil avec labour en parcelle aménagée (MP3)

LEGENDE

A11C : Croûtes de ruissellement et/ou d'érosion

ApC : Ensemble de croûtes de ruissellement et/ou d'érosion et de croûtes de décantation

ApS : Volume sarclé

ApL : Volume labouré non sarclé

A11 : Horizon à chevelu racinaire dense

A12 : Horizon A ne présentant pas de modification morphologique visible

Tableau III. 1 : Caractéristiques des volumes structuraux des profils culturaux du sol de mi-pente (MP1, MP2 et MP3)

Volumes	Proportion en % du volume total	Couleur	Structure	Cohésion	Porosité	Abondance des Débris organiques
A11C (MP1)	4,4		litée		pores vésiculaires nombreux	peu abondants
A11 (MP1)	21,6	7.5YR 6/6	massive à tendance litée	faible	pores tubulaires assez nombreux	chevelu racinaire dense
ApS (MP2/MP3)	15,6 à 19,6	7.5YR 5/6	particulaire à motteuse	meuble	pores tubulaires peu nombreux	assez abondants
ApC (MP2/MP3)	3,2 à 3,4		particulaire à litée		pores vésiculaires nombreux	peu abondants
ApL (MP3)	19,1	7.5YR 5/6	massive à motteuse peu nette	faible à moyenne	pores vésiculaires nombreux	assez abondant
A12 (MP1/MP2/MP3)	63,4 à 78,0	7.5YR 5/6	massive peu fissurée à débit mammelonné	faible à moyenne		

2.2. Sol de bas de pente

Comme pour le sol précédent, c'est seulement au niveau de l'horizon A que les effets des systèmes de culture sont les plus marqués. Ce dernier peut être divisé en plusieurs volumes suivant les différences de structure, de cohésion et de porosité tubulaire (fig.III.2). Les caractéristiques des différents volumes sont rassemblées dans le tableau III.2.

Sous **jachère arbustive de 5 ans BP1** (fig. III.2.1), l'horizon A est divisé en trois volumes. Le volume A1 (0-10 cm), à chevelu racinaire dense et de structure polyédrique subangulaire, contient de nombreux pores tubulaires et est peu cohérent. Le volume sous-jacent, A21a, de 5 à 8 cm d'épaisseur et de structure massive, est plus foncé et plus cohérent que A1. Le troisième volume A22 (15-35 cm), est moins cohérent et un peu plus structuré (structure massive fissurée) que A21a.

Sous culture, le volume A1 est remplacé par les volumes travaillés dont les caractères sont fonction du système de culture. Mais, dans les deux cas, ils sont associés à des croûtes superficielles ApC.

Sous **culture continue avec faible fumure organique sans labour BP2** (fig. III.2.2), le volume sarclé ApSf est plus foncé que A1 et a une structure motteuse à massive. Il contient d'assez abondants débris organiques (petits morceaux de paille de mil, d'adventices et de déjections animales, mal décomposés) et est plus poreux (porosité tubulaire) et plus cohérent que A1. Le volume A21b présente les mêmes caractéristiques de couleur et de structure que A21a de BP1 et en diffère par son importance (2 fois plus épais), sa porosité tubulaire plus importante et sa cohésion plus forte. Le volume A22, est comparable à celui de BP1 sauf qu'il a une cohésion et une porosité tubulaire sensiblement plus élevées.

Concernant le profil **sous culture continue avec forte fumure et labour annuel BP3** (fig. III.2.3), le volume labouré et sarclé ApSLF est plus massif et cohérent et contient plus de débris organiques et de pores tubulaires que ApSf de BP2. Les autres volumes A21c et A22 ont respectivement les mêmes caractères que A21b et A22 de BP2 avec cependant une porosité tubulaire et une cohésion plus élevées que ces derniers.

Figure III.2 : Volumes structuraux dans l'horizon 0-35 cm des profils culturaux du sol de bas de pente.

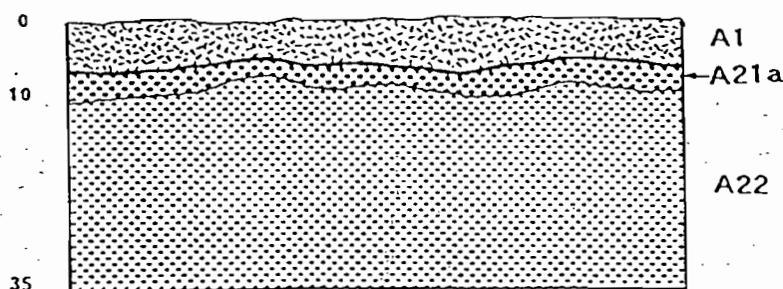


Figure III.2.1 : Profil sous jachère herbacée de 5 à 6 ans (BP1)

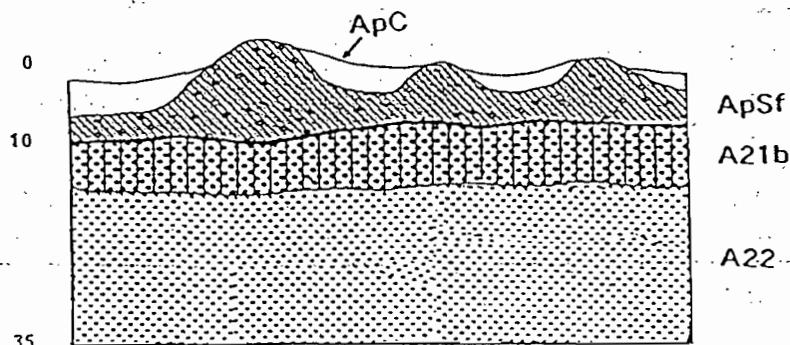


Figure III.2.2 : Profil cultural culture continue de mil avec avec une faible fumure organique sans labour (BP2)

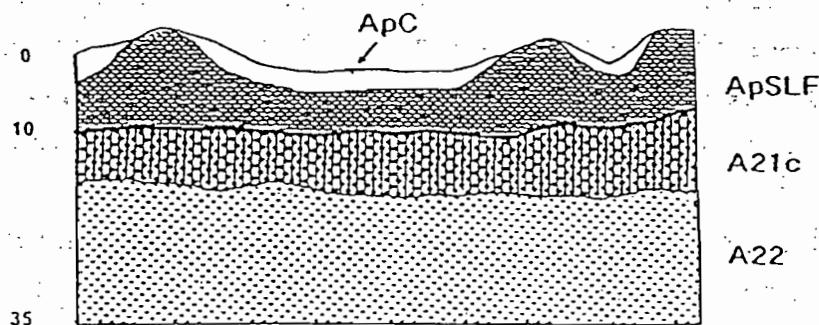


Figure III.2.3 : Profil cultural sous culture continue de mil avec labour et forte fumure organique (BP3)

LEGENDE

- ApC : Ensemble de croûtes de ruissellement et/ou d'érosion et de croûtes de décantation
- ApSf : Volume sarclé recevant une faible fumure organique
- ApSLF : Volume labouré et sarclé recevant une forte fumure organique
- A1 : Horizon à chevelu racinaire plus ou moins dense
- A21a : Volume sous-cultural assez compact à compact
- A21b : Volume sous-cultural compact
- A21c : Volume sous-cultural très compact
- A22 : Horizon A moins perturbé par la mise en culture

Tableau III.2 : Caractéristiques des volumes structuraux des profils culturaux du sol de bas de pente (BP1, BP2 et BP3)

Volumes	Proportion en % du volume total	Couleur	Structure	Cohésion	Porosité	Abondance des Débris organiques
A1 (BP1)	16,8	10YR 5/4	polyédrique subangulaire	faible	pores tubulaires assez nombreux	chevelu racinaire
ApC (BP2/BP3)	5,5 à 6,6		particulaire à litée		pores vésiculaires très nombreux	peu abondants
ApSf (BP2)	18,9	10YR 5/6	motteuse à massive	moyenne à faible	pores tubulaires nombreux	assez abondants
ApSLF (BP3)	20,7	10YR 5/6	massive à motteuse	moyenne	pores tubulaires très nombreux	abondants
A21a (BP1)	9,2	10YR 5/6	massive	moyenne à faible	pores tubulaires peu nombreux	
A21b (BP2)	21,7	10YR 5/6	massive	moyenne	pores tubulaires assez nombreux	
A21c (BP3)	19,5	10YR 5/6	massive	forte	pores tubulaires nombreux	
A22 (BP1/BP2/BP3)	53,2 à 74,0	10YR 5/4	massive fissurée à tendance prismatique mal développée	moyenne	pores tubulaires peu nombreux à nombreux	

2.3. Sol de bas-fond

Sur la profondeur observée, on distingue un horizon A à deux niveaux (A1 et A1g) et un horizon Bg (fig. III.3). Les caractères morphologiques des volumes structuraux sont résumés dans le tableau III.3.

Sous forêt galerie dégradée (BF1) l'horizon A du sol est constitué de deux volumes (fig. III.3.1) :

- Le volume A1 (0-10 cm) de couleur jaunâtre (10YR 5/6), est fortement organique et contient des débris végétaux (petits morceaux de bois et pailles de graminées et feuilles mortes) très abondants. De structure massive à tendance litée et de cohésion moyenne, il contient des pores tubulaires très nombreux.

- Le volume A1g (10-35 cm) est plus clair (10YR 5/8) et cohérent, à structure massive à tendance polyédrique peu nette. Les débris organiques y sont abondants et les pores tubulaires très nombreux.

Pour le sol cultivé (BF2), l'horizon A est subdivisé en deux volumes (fig. III.3.2):

- Le volume sarclé ApS (0-10 cm), de couleur jaunâtre (10YR 5/4), a une structure massive à motteuse et une cohésion moyenne. Les débris organiques constitués essentiellement de racines mortes et de pailles d'adventices, sont assez abondants. Les pores tubulaires sont assez nombreux.

- Le volume A1g (10-35 cm) est plus sombre (10YR 6/6) avec une structure massive et des pores tubulaires assez nombreux.

L'horizon Bg à pseudogley, présente les mêmes caractères dans les deux profils (BF1 et BF2) à l'exception des pores tubulaires dont l'importance diminue de BF1 à BF2 et des débris organiques plus abondants en BF1 qu'en BF2.

Figure III.3 : Volumes structuraux dans l'horizon 0-35 cm des profils culturaux du sol hydromorphe peu humifère à pseudogley de bas-fond.

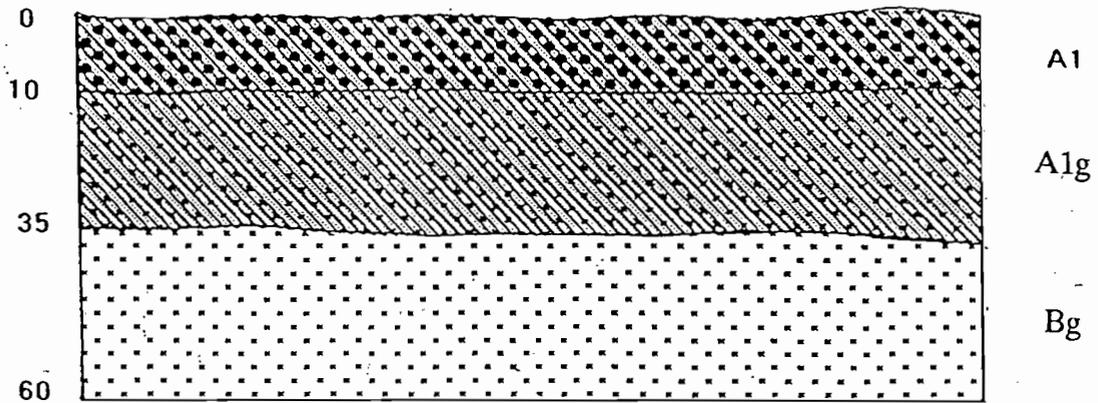


Figure III.3.1 : Profil sous forêt galerie dégradée (BF1).

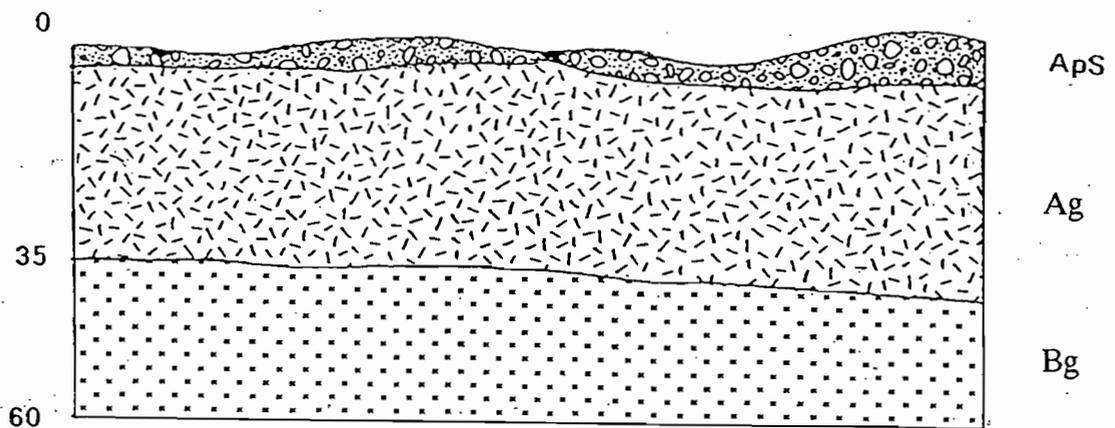


Figure III.3.2 : Profil cultural sous culture continue de sorgho (BF2).

LEGENDE

A1 : Volume fortement organique

A1g : Volume organique

ApS : Volume sarclé

Ag : Horizon A non sarclé faiblement organique

Bg : Horizon B

Tableau III.3 : Caractéristiques des volumes structuraux des profils culturaux du sol de bas-fond (BF1 et BF2)

Volumes	Couleur	Texture	Structure	Cohésion	Porosité	Abondance des Débris organiques
A1 (BF1)	10YR 5/6	argilo-sableuse	massive à tendance litée	moyenne	pores tubulaires très nombreux	très abondants
A1g (BF1)	10YR 5/8	argilo-sableuse	massive à tendance polyédrique peu nette	forte	pores tubulaires très nombreux	abondants
ApS (BF2)	10YR 5/4	argilo-sableuse	massive à motteuse	forte	pores tubulaires assez nombreux	assez abondants
Ag (BF3)	10YR 6/6	argilo-sableuse	massive	très forte	pores tubulaires assez nombreux	
Bg (BF1/BF2)	10YR 6/3 à 10YR 5/4	argilo-sableuse	polyédrique moyennement développée	forte	pores tubulaires assez nombreux à nombreux	absents à peu abondants

2.4. Discussion et conclusion

Pour les trois sols étudiés, mis à part les volumes sarclés du sol sableux et le volume A1 du sol de bas de pente, les volumes de surface se caractérisent par une structure massive ou à tendance massive, plus ou moins litée. Cette tendance est liée aux phénomènes de prise en masse, de tassement et d'érosion en raison de la faible protection des sols contre l'action des facteurs climatiques. La faible stabilité de la structure se traduit aussi par la formation des croûtes superficielles (A11C et ApC). La formation de ces croûtes s'expliquerait par le mécanisme de détachement/transport et dépôt de particules lié de la vitesse de l'eau et du vent, en relation avec le microrelief, la nature du sol (texture, taux de matière organique, etc...) et les conditions climatiques (CASENAVE et VALENTIN, 1988). Les sols ferrugineux de versant, plus sableux, sont plus sensibles à ce phénomène que le sol hydromorphe de bas-fond. Ces résultats confirment les observations de CHARREAU (1972), CHARREAU et NICOU (1971) montrant que la dégradation structurale des sols est quasi générale en zone soudano-sahélienne. Les systèmes de culture interviennent surtout sur l'ampleur de cette action des facteurs climatiques qui semble augmenter avec la pratique du labour.

En mi-pente, les résultats confirment que, quel que soit le type d'occupation du sol (MP1, MP2 ou MP3), l'horizon de surface du sol a tendance à se transformer en une couche à structure massive et litée plus ou moins compacte sous l'action des pluies et/ou du vent. FAUCK *et al.* (1969), SIBAND (1972 et 1977), CHARREAU (1972) et CASENAVE et VALENTIN (1988) décrivent le litage des horizons travaillés comme un indicateur de la dégradation des sols sableux qui se trouvent davantage affectés par l'action des agents climatiques. CHARREAU et NICOU (1971 et 1985) et NICOU (1971) préconisent le labour comme remède pour ameublir le profil cultural de ces sols dits "structuralement inactifs" car très pauvres en argile. Mais, d'après nos observations, le processus paraît plus important dans les systèmes de culture comportant un labour annuel avec la formation du volume ApL dans MP3. Seules les couches fréquemment sarclées restent meubles avec une structure particulière plus ou moins motteuse.

En bas de pente, seule la couche de surface du sol sous jachère herbacée de 5 ans BP1, est meuble avec une structure développée. Ceci s'expliquerait par le développement du système racinaire des graminées herbacées. Cette action de la jachère sur l'amélioration du profil cultural a été décrite par CHARREAU et NICOU (1971). La cohésion et l'épaisseur relatives du volume massif A21 (a,b et c) augmentent avec l'intensité des opérations culturales de BP1 à BP3. Ceci peut s'expliquer par l'action dégradante du labour répété qui a été observée dans ces sols par CHARREAU (1972) et CHARREAU et NICOU (1971 et 1985). En BP3, le piétinement du bétail

parqué sur le champ en saison sèche réduit en poussière les 5 premiers cm du sol. Cela peut ensuite favoriser les phénomènes de prise en masse et de battance.

L'effet des systèmes de culture se traduit aussi par l'abondance des débris organiques (petits morceaux de paille de mil, d'adventices et de déjections animales, mal décomposés) dans les volumes sarclés, abondance proportionnelle à l'importance des apports. L'activité faunique (remontées de termites et porosité tubulaire) augmente dans le même sens.

Dans le bas-fond, l'effet de l'occupation du sol sur la structure est peu marqué ; seule la couche 10-35 cm du sol sous forêt galerie dégradée BF1 a une structure relativement plus développée. Mais ce sont l'abondance des débris organiques et l'importance de la porosité de l'horizon A (0-35 cm) qui constituent les principales différences entre le sol sous forêt galerie dégradée BF1 et le sol cultivé BF2. Le premier (BF1) contient de nombreux débris organiques (petits morceaux de bois et pailles de graminées et feuilles d'arbustes) plus ou moins décomposés. Dans le second (BF2), par contre, on n'observe pas une telle abondance des débris organiques mais seulement des racines herbacées mortes et des pailles incorporées au sol lors des sarclages. L'abondance en matière organique a favorisé le développement d'une activité faunique (termites, etc...) qui se traduit par une porosité fonctionnelle tubulaire importante dans BF1.

On retiendra de ces résultats que dans le cas général de la zone concernée, les facteurs climatiques (pluie et vent) tendent à imprimer à la structure de la couche supérieure du sol un caractère massif plus ou moins litée, surtout pour les sols à texture sableuse. On note également une diminution des quantités de débris organiques dans l'horizon de surface des sols cultivés sans restitutions organiques (MP2 et MP3 pour le sol de mi-pente et BF2 pour celui de bas-fond) par rapport au sol sous jachère de 15 ans (MP1) ou sous forêt galerie dégradée (BF1). Mais dans les systèmes de culture avec fumure organique (BP2 et BP3), l'horizon travaillé s'enrichit en débris organiques par rapport au sol sous jachère de 5 ans. L'abondance des débris semble accroître l'activité faunique (termites essentiellement).

3. INFLUENCE SUR LA GRANULOMETRIE DES SOLS

3.1. Sol de mi-pente

Les résultats analytiques sont représentés dans la figure III.4.

Les teneurs en argile du sol sous jachère MP1 augmentent de 6 % en surface à 15,4 % en profondeur. Celles de limons, peu variables, sont comprises entre 7 et 10 %.

La fraction sableuse est plus importante avec des teneurs qui diminuent de 83 % en surface à 74 % en profondeur.

Dans les profils sous culture (MP2 et MP3), les teneurs suivent la même variation verticale et sont du même ordre de grandeur que sous MP1. Dans les deux cas, les argiles vont de 9 à 16 %, les limons de 5 à 10 % et enfin les sables de 84 à 74 %.

Ces résultats montrent que les systèmes de culture n'ont pas d'effet apparent sur la texture du sol.

3.2. Sol de bas de pente

Les profils granulométriques sont représentés dans la figure III.5.

Dans le sol sous jachère de 5 ans BP1, les teneurs en argile et en limon augmentent avec la profondeur : elles varient respectivement de 6 à 35 % et de 17 à 26 %. La fraction sableuse est prédominante avec des teneurs qui diminuent de 76 % en surface à 40 % en profondeur.

Les profils granulométriques du sol sous culture BP2 et BP3 sont presque identiques à ceux de BP1. Les teneurs en argile augmentent de 7 % en surface à 21 % en profondeur pour BP2 contre 10 à 25 % pour BP3. La fraction limoneuse suit une variation verticale similaire avec 14 à 37 % pour BP2 et 17 à 24 % pour BP3. Les teneurs en sable diminuent avec la profondeur de 77 à 40 % et de 71 à 49 % respectivement pour BP2 et BP3.

Pour ce sol également, il n'apparaît pas d'effet net des systèmes de culture vis-à-vis de la texture. Mais les résultats granulométriques mettent bien en évidence les différences texturales entre l'horizon lessivé de surface et l'horizon B.

3.3. Sol de bas-fond

Les résultats sont représentés dans la figure III.6.

Dans les deux sols (sol de savane BF1 et sol cultivé BF2), les teneurs en argile augmentent avec la profondeur. Elles varient de 21,1 à 26,4 % pour BF1 et de 21,00 à 31,0 pour BF2. Le profil de limon varie peu pour BF1 (35,6 à 33,4 %) avec cependant un léger creux (30,4 %) dans la couche 10-35 cm. Pour BF2 par contre, il augmente avec la profondeur (21,5 à 32,3 %) mais présente un ventre assez prononcé (42,0 %) dans la couche 10-35 cm. Concernant la fraction sableuse, les teneurs comprises entre 39,7 et 37,0 %, présentent un ventre (46,2 %) dans la couche 10-35 cm pour BF1. Dans BF2, les teneurs diminuent de 55,5 à 34,3 % avec un creux (24,0 %) à 10-35 cm.

Figure III.4 : Profil granulométrique du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture

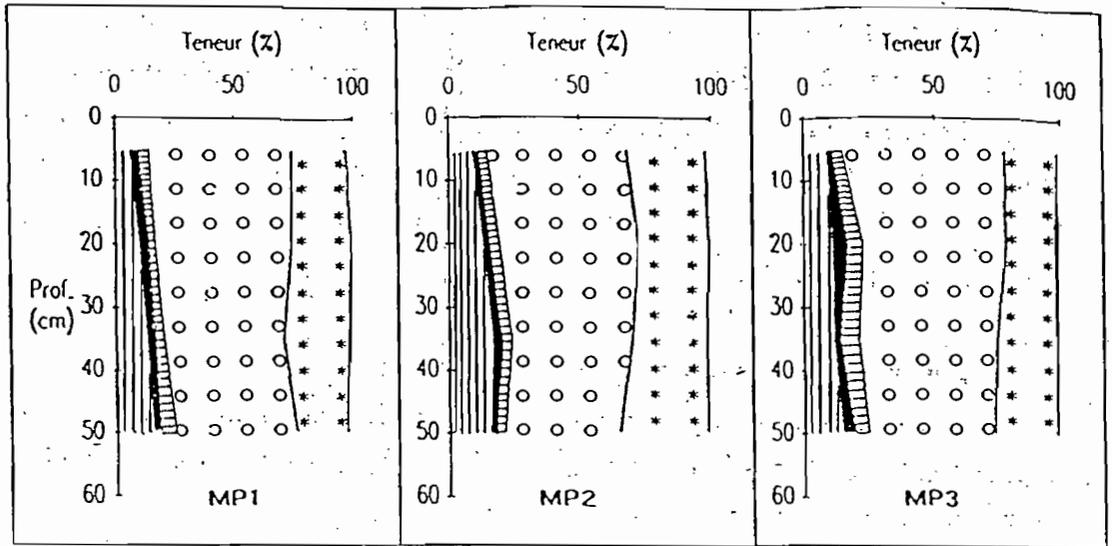


Figure III.5 : Profil granulométrique du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture

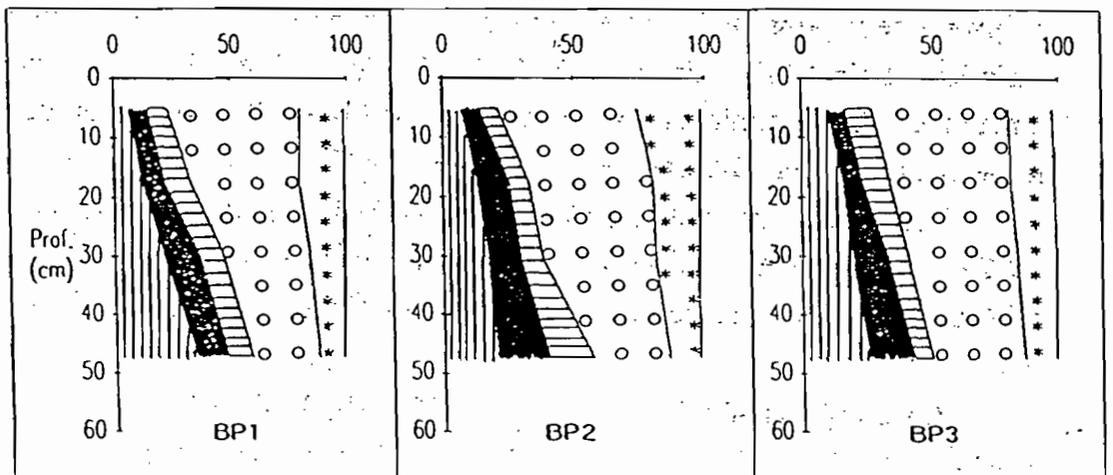
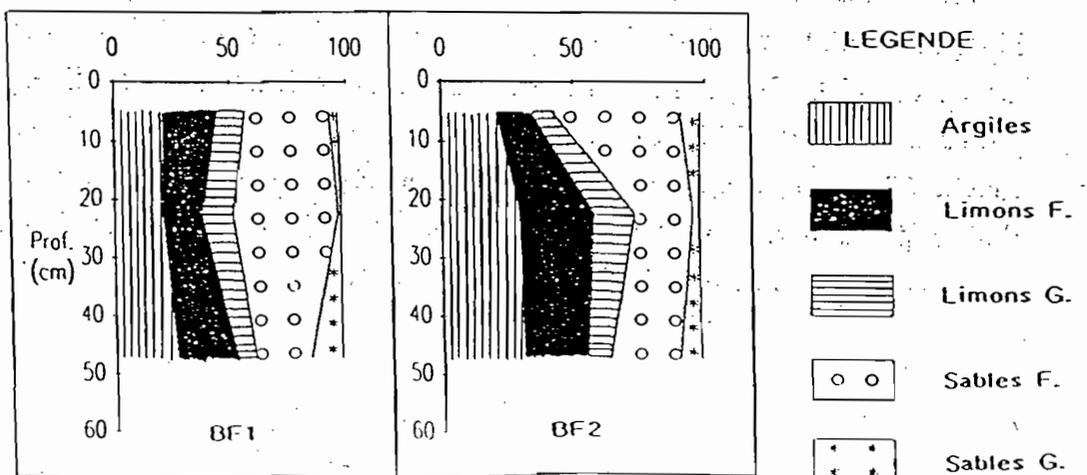


Figure III.6 : Profil granulométrique du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture



La différence granulométrique entre les deux situations varie en fonction de la profondeur. Dans la couche 0-10 cm la différence entre BF1 et BF2 porte sur les teneurs en limon (14 % de plus dans BF2) et en sables (15,8 % de plus dans BF1). Entre 10 et 35 cm toutes les fractions sont concernées ; les teneurs en argile et en limon sont plus élevées dans BF2 avec des écarts de 10 et 13 % respectivement alors que BF1 contient 22 % de sable de plus que BF2. Entre 35 et 65 cm les écarts sont plus faibles ; BF2 contient plus d'argile (4,6 %) et de sable (2,6 %) que BF1. Les résultats semblent révéler pour le sol cultivé, un appauvrissement en éléments fins de l'horizon de surface au profit de la couche sous-jacente.

3.4. Discussion et conclusion

Pour la profondeur observée (0-60 cm), les résultats ne permettent pas de conclure à une modification nette de la texture des sols ferrugineux de versant sous l'effet des systèmes de culture. Des résultats similaires ont été obtenus par PALLO (1982).

Pour le sol de bas-fond par contre, on observe des différences sensibles entre le sol sous forêt galerie dégradée BF1 et le sol cultivé BF2. Dans les 10 premiers centimètres de BF2, il y a une augmentation des teneurs en sable, aux dépens des teneurs en limons. En remaniant continuellement le sol, les sarclages répétés pourraient favoriser l'entraînement des éléments fins. Mais ces résultats pourraient aussi être attribués à des différences du matériau colluvio-alluvial déposé, le bas-fond étant un milieu hétérogène. Ce qui expliquerait les différences observées en profondeur. Dans tous les cas il n'y a pas de changement de classe de texture par rapport au sol sous forêt galerie dégradée.

Les résultats confirment les différences texturales entre les trois types de sols avec des teneurs en éléments fins (argile + limon) qui augmentent du sol de mi-pente au sol de bas-fond. Mais sur les 60 premiers centimètres de ces sols sableux à argilo-sableux de versant ou de bas-fond, les systèmes de culture n'entraînent pas de modifications sensibles de la texture.

4. INFLUENCE SUR LE STATUT ORGANIQUE (CARBONE ORGANIQUE ET AZOTE TOTAUX) DES SOLS

4.1. Sol de mi-pente

La figure III.7 présente les profils de carbone organique et d'azote totaux en fonction des systèmes de culture. Les valeurs correspondantes sont regroupées en ANNEXE III.1.

Les teneurs en carbone organique sont plus élevées dans le sol sous jachère MP1 où elles varient de 0,42 % en surface à 0,23 % en profondeur. Les teneurs du sol sous culture sont plus faibles et diminuent également avec la profondeur avec cependant un léger ventre dans la couche 10-25 cm. Elles varient de 0,23 à 0,15 % dans le sol cultivé sans labour ni aménagement antiérosif MP2 contre 0,26 à 0,18 % dans le sol cultivé avec labour et aménagement MP3. La culture continue de mil entraîne donc une baisse des teneurs en carbone organique par rapport au sol sous jachère MP1. Cette baisse est plus marquée dans l'horizon 0-10 cm où elle représente environ 50 % pour MP2 et 40 % pour MP3.

Concernant l'azote total, le sol sous jachère MP1 montre toujours des teneurs plus élevées variant de 0,38 ‰ en surface à 0,23 ‰ en profondeur. Les teneurs du sol cultivé varient dans le même sens et sont semblables dans MP2 (0,22 à 0,14 ‰) et MP3 (0,23 à 0,12 ‰). La baisse des teneurs dans le sol cultivé concerne toute la couche 0-60 cm mais elle est plus marquée dans l'horizon 0-10 cm où elle atteint 40 %.

L'analyse statistique (ANNEXE III.1) montre que la différence entre le sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1 et le sol sous culture (MP2 et MP3) est significative au seuil de 5 %. Par contre, les teneurs en carbone organique et azote totaux de MP2 et MP3 sont comparables.

4.2. Sol de bas de pente

Les profils de carbone organique total et d'azote total sont représentés par la figure III.8. Les valeurs détaillées correspondantes sont données en ANNEXE III.1.

Les profils de carbone organique total et d'azote total diminuent avec la profondeur.

Les teneurs en carbone organique total sont faibles dans le sol sous jachère herbacée de 5 ans BP1 (0,30 à 0,20 %). Elles sont plus élevées dans le sol sous culture où elles varient de 0,37 à 0,25 % pour le sol cultivé avec une faible fumure organique BP2 et de 0,52 à 0,18 % pour le sol cultivé avec une forte fumure BP3. La différence entre les trois profils concerne surtout l'horizon 0-10 cm où la culture continue avec une fumure organique entraîne, par rapport au sol BP1, une augmentation des teneurs en carbone organique total de 25 % pour BP2 et de plus de 73 % pour BP3.

Figure III.7 : Profils des teneurs en carbone organique et azote totaux du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture.

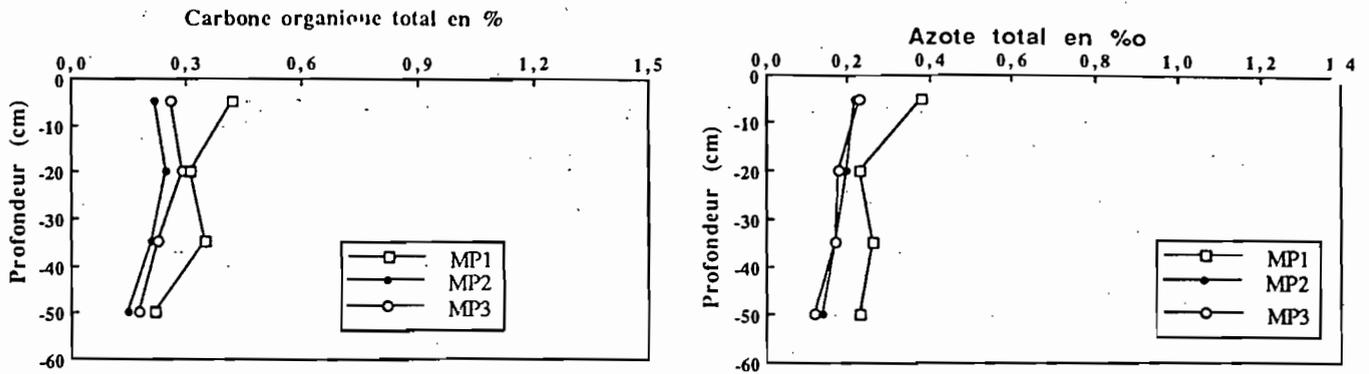


Figure III.8 : Profils des teneurs en carbone organique et azote totaux du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture.

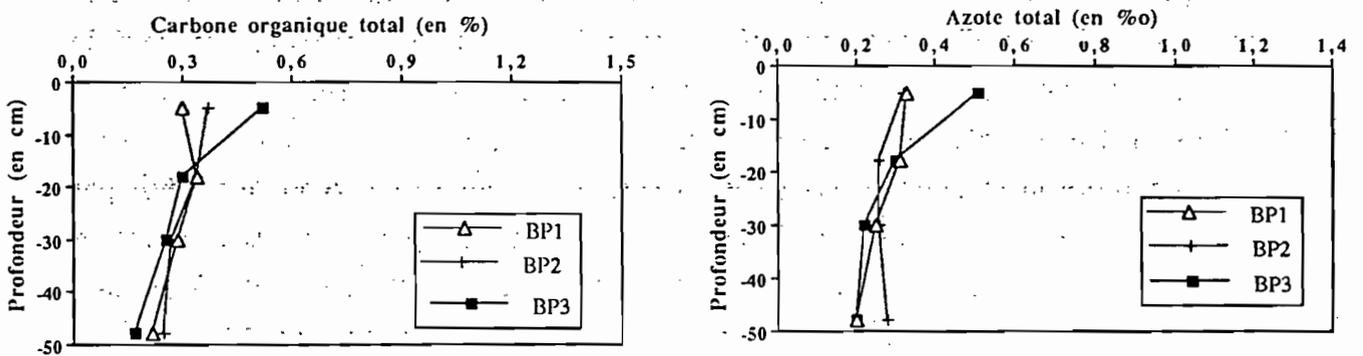
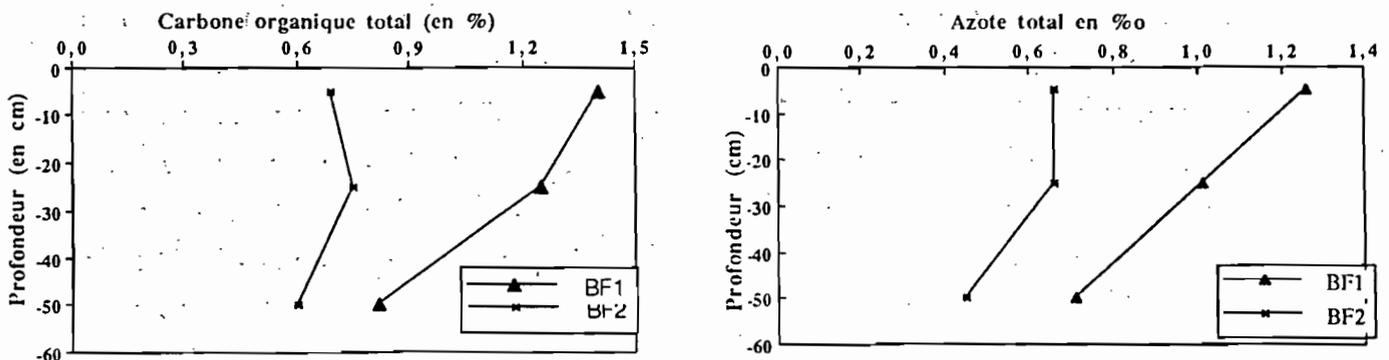


Figure III.9 : Profils des teneurs en carbone organique et azote totaux du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture.



Pour l'azote total, les teneurs du sol BP1 diminuent de 0,33 ‰ en surface à 0,20 ‰ en profondeur. Le sol BP2 a des teneurs comparables à celles de BP1 (0,32 à 0,25 ‰) alors qu'elles varient de 0,51 à 0,17 ‰ dans le sol BP3. Seul l'horizon 0-10 cm de ce dernier montre des teneurs plus élevées ; soit une augmentation de 60 % par rapport à BP1.

La comparaison statistique (ANNEXE III.1) révèle que seules les teneurs en carbone organique et azote totaux de la couche 0-10 cm du sol BP3 présentent des différences significatives avec celles de BP1 et BP2 au seuil de 5 %.

4.3. Sol de bas-fond

Les profils de carbone organique total, d'azote total et du C/N sont représentés dans la figure III.9. Le détail des données est présenté en ANNEXE III.1.

Les teneurs en carbone organique total du sol sous forêt galerie dégradée BF1 diminuent fortement de 1,45 % en surface à 0,82 % en profondeur. Les teneurs en azote total varient dans le même sens de 1,26 à 0,71 ‰. Pour le sol cultivé BF2, les profils de carbone organique et d'azote totaux présentent un léger ventre entre 10 et 35 cm mais la variation des teneurs entre la surface et la profondeur est relativement faible (de 0,69 à 0,60 % pour C et de 0,66 à 0,45 ‰ pour N).

Sur toute la profondeur observée, la culture continue de sorgho se traduit par une baisse des teneurs en carbone organique et azote totaux du sol par rapport à la forêt galerie dégradée. Dans la couche 0-10 cm où cela est plus marquée, la diminution représente 59 et 48 % respectivement pour le carbone organique total et l'azote total.

L'analyse statistique (ANNEXE III.1) montre que seules les teneurs en carbone organique total présentent, sur les 35 premiers centimètres, une différence significative au seuil de 5 %.

4.4 Discussion et conclusion

En mi-pente les teneurs en carbone organique et azote totaux du sol sont plus élevées sous jachère arbustive MP1. Elles diminuent avec la mise en culture, de façon plus marquée dans la couche 0-10 cm. Sous culture continue sans labour ni aménagement antiérosif MP2, la baisse est d'environ 50 % des teneurs en carbone organique et azote totaux dans les 10 premiers centimètres. Pour le sol sous culture continue avec labour et aménagement MP3, la baisse significative (seuil de 5 %) des teneurs est également de 50 % pour l'azote total et légèrement plus faible (40 %) pour le carbone organique total. Les plus fortes teneurs en carbone organique et azote totaux

du sol sous jachère de 15 ans s'expliquent par le double rôle de la végétation comme source de matière organique et comme protecteur du sol contre l'érosion. Cet effet de la jachère de longue durée a été observé par plusieurs auteurs (BOYER, 1970 ; CHARREAU et NICOU, 1971 ; CHARREAU, 1972 et PIERI, 1989). Inversement, la baisse des teneurs dans le sol cultivé peut être attribuée à une réduction des restitutions organiques limitées essentiellement à la biomasse racinaire. La différence entre les deux situations cultivées porte sur les teneurs en carbone organique total qui sont relativement plus élevées dans MP3 alors que les teneurs en azote total sont du même ordre de grandeur dans MP2 et MP3. SERPANTIE (comm. personnelle) enregistre dans MP3, une plus forte densité de racines constituant davantage de matière organique à C/N élevé par rapport à MP2. La pauvreté en azote de cette matière organique explique que la différence entre MP2 et MP3 soit plus nette pour le carbone que pour l'azote. Les teneurs en carbone organique total relativement plus élevées dans MP3 peuvent s'expliquer par les effets combinés du labour et de l'aménagement antiérosif qui favoriseraient le développement racinaire (CHARREAU et NICOU, 1971 ; NICOU, 1971 et 1985 ; PIERI, 1989 et SOME, 1989).

En bas de pente la différence entre les systèmes de culture concerne la couche 0-10 cm. Les teneurs en carbone organique et azote totaux du sol augmentent dans les systèmes de culture comportant un apport de matière organique. Elles sont plus faibles dans le sol sous jachère herbacée de 5 ans BP1. Dans le sol recevant une faible fumure organique BP2, les teneurs en carbone organique total augmentent de 25 % alors que celles en azote total sont du même ordre de grandeur que BP1. Pour le sol cultivé avec une forte fumure BP3, l'augmentation est de l'ordre de 73 et 60 % pour le carbone organique et l'azote totaux. Le niveau des apports de matière organique, plus important dans BP3, explique les différences entre les trois situations. L'enrichissement du sol en matière organique par la jachère de 5 ans BP1 n'est pas observé comme dans le cas du sol de mi-pente MP1. CHARREAU et NICOU (1971) montrent qu'il faut, dans cette zone, 10 à 15 années de jachère continue pour reconstituer le stock organique du sol.

Dans le bas-fond la culture continue de sorgho BF2 entraîne une baisse des teneurs en carbone organique et azote totaux par rapport au sol sous forêt galerie dégradée BF1. Cette chute concerne surtout l'horizon A (0-35) et en particulier la couche 0-10 cm où elle atteint 59 et 48 % respectivement pour carbone organique et l'azote totaux. Cet effet de la mise en culture sur la diminution des réserves organiques du sol a été fréquemment décrit pour d'autres types de sols en milieu tropical (BOYER, 1970 ; SANCHEZ, 1976 ; ROOSE, 1981 ; SEDOGO, 1981 et PIERI, 1989). La faiblesse des restitutions organiques par le système de culture en est la principale cause. De plus, les quelques résidus qui restent à la surface du sol en fin de saison sèche sont transportés par les premières pluies. Sous forêt galerie dégradée BF1, par contre, la

présence de la végétation, joue un triple rôle en apportant de la litière et des racines, en réduisant les transports par érosion et en favorisant les dépôts de matières organiques contenues dans les eaux d'inondation du bas-fond.

Ces résultats quantitatifs confirment que, par rapport au sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1 ou sous forêt galerie dégradée BF1, les teneurs en matière organique baissent dans le sol cultivé sans restitutions organiques autres que la biomasse racinaire. Cependant, dans les systèmes de culture pratiquant la fumure organique, les teneurs en matière organique augmentent dans la couche 0-10 cm, proportionnellement aux quantités apportées, par rapport à la jachère herbacée de 5 ans BP1.

En plus de ces modifications quantitatives, peuvent intervenir des modifications qualitatives de la matière organique des sols. Cet aspect sera abordé dans le chapitre IV.

5. INFLUENCE SUR LES CARACTERES CHIMIQUES DES SOLS

5.1. Sol de mi-pente

Les profils des bases échangeables, phosphore total, le phosphore assimilable et du pH sont illustrés par la figure III.10. Le détail des données est présenté en ANNEXE III.2.

5.1.1. Bases échangeables

Les teneurs en **calcium échangeable** augmentent avec la profondeur. Elles sont plus élevées dans le sol sous jachère MP1 (0,99 à 1,24 cmol.kg⁻¹). Celles du sol sous culture, plus faibles, varient de 0,65 à 1,03 cmol.kg⁻¹ pour le sol cultivé sans labour ni aménagement MP2 et de 0,58 à 1,08 cmol.kg⁻¹ pour le sol cultivé avec labour et aménagement MP3. La différence entre les trois profils concerne surtout l'horizon 0-10 cm dont la mise en culture entraîne, par rapport à la jachère, une baisse des teneurs en calcium échangeable de l'ordre de 34 % pour MP2 et de 42 % pour MP3.

Concernant le **magnésium échangeable**, les teneurs augmentent également avec la profondeur. Le sol MP1 enregistre les plus fortes teneurs (0,32 à 1,05 cmol.kg⁻¹) par rapport au sol sous culture dont les teneurs varient de 0,23 à 0,67 cmol.kg⁻¹ pour MP2 et de 0,30 à 0,80 cmol.kg⁻¹ pour MP3. Ces résultats montrent une baisse de 47 % (MP2) et de 30 % (MP3) des teneurs en magnésium échangeable de l'horizon travaillé 0-10 cm par rapport à celui de MP1.

Les profils de **potassium échangeable** diminuent avec la profondeur. Les teneurs sont plus élevées dans le sol MP1 (0,26 à 0,13 cmol.kg^{-1}) et plus faibles dans le sol sous culture où elles varient de 0,22 à 0,09 cmol.kg^{-1} pour MP2 contre 0,15 à 0,05 cmol.kg^{-1} pour MP3. Ces résultats montrent que les teneurs en potassium échangeable sont également affectées par la culture de mil. Dans la couche 0-10 cm où cela est plus marqué, la baisse des teneurs par rapport à MP1, est de 15 % pour MP2 contre 42 % pour MP3.

5.1.2. Le pH

Le pH eau du sol sous jachère MP1 varie de faiblement acide (6,1) dans la couche 0-10 cm à moyennement acide (5,9) en profondeur. Dans le sol sous culture il varie peu en fonction de la profondeur et appartient à la gamme de pH moyennement acide (5,8 à 5,6 pour MP2 et 5,6 à 5,7 pour MP3).

Le pH KCl suit la même tendance avec des valeurs plus élevées dans la couche 0-10 cm du sol sous jachère MP1 (5,1) et plus faibles en profondeur (4,3 à 4,5). Sous culture il varie dans les deux cas (MP2 et MP3) de 4,2 à 4,4.

Ces résultats montrent une légère acidification du sol avec la mise en culture. Cette diminution du pH par rapport au sol sous jachère concerne uniquement la couche travaillée (0-10 cm) et est du même ordre de grandeur dans MP2 et MP3.

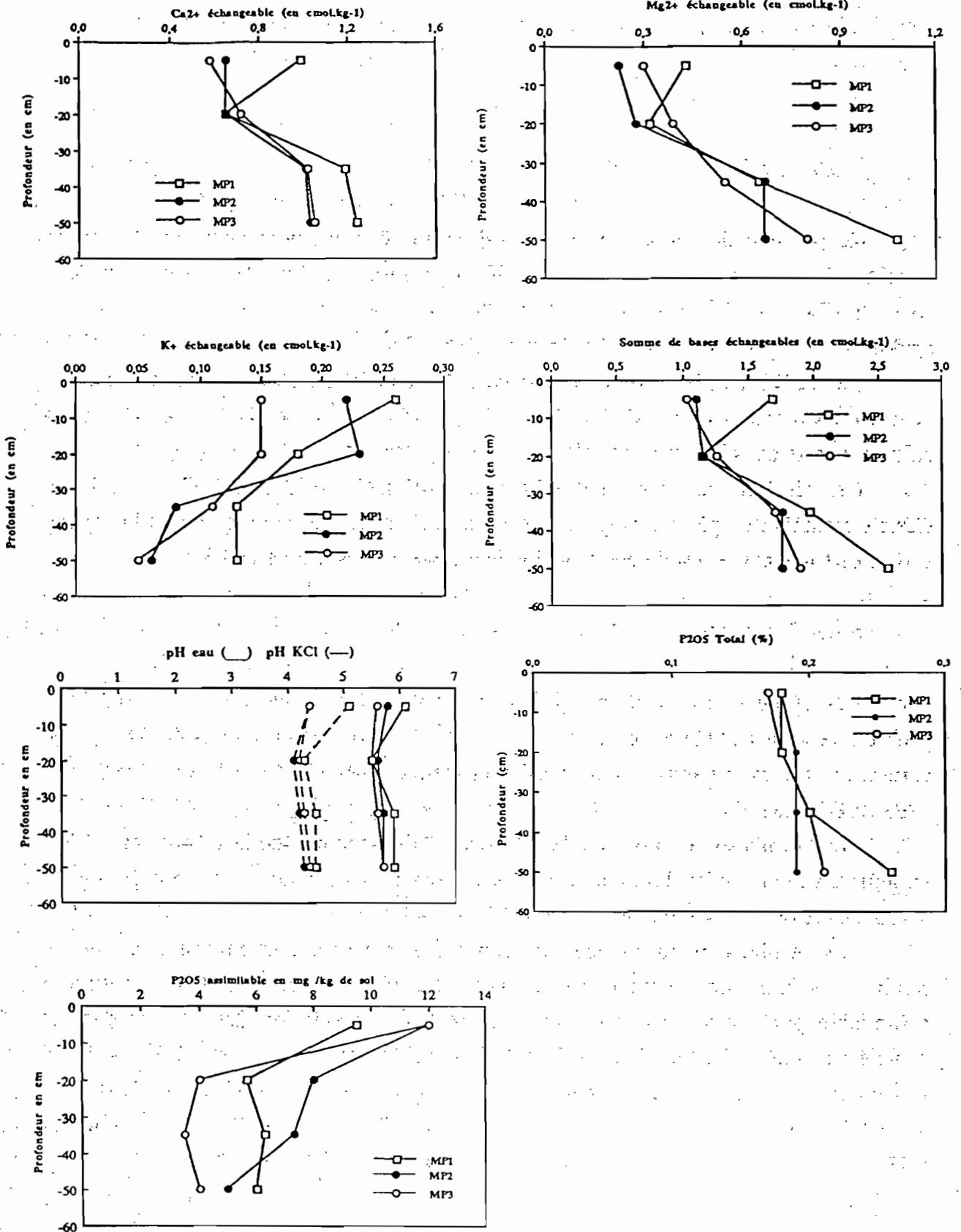
5.1.3. Phosphore total et phosphore assimilable

Les teneurs en phosphore (P_2O_5) total du sol sous jachère MP1 augmente progressivement de 0,18 % en surface à 0,26 % en profondeur. Celles du sol cultivé varient dans le même sens et sont quasiment identiques pour MP2 (0,18 à 0,19 %) et MP3 (0,17 à 0,21 %).

Pour le phosphore assimilable, les teneurs diminuent avec la profondeur. Elles varient de 9,5 à 6 mg/kg de sol pour le sol sous jachère MP1 contre 12,5 à 5 mg/kg et 12 à 4 mg/kg respectivement pour MP2 et MP3.

Ces résultats montrent que, par rapport à la jachère, la culture continue ne semble pas modifier les teneurs en phosphore total du sol. Pour le phosphore assimilable par contre on observe une très faible augmentation des teneurs dans la couche travaillée (0-10 cm) de MP2 et MP3. Ceci pourrait être attribué à la fumure minérale que le sol cultivé reçoit chaque année (25 kg/ha d'engrais NPK 15-20-15).

Figure III.10 : Profils de pH et des teneurs en cations échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture



5.2. Sol de bas de pente

Les données, concernant les bases échangeables et le pH, le phosphore assimilable et le phosphore total, illustrées par la figure III.11, sont regroupées en ANNEXE III.2.

5.2.1. Bases échangeables

Les teneurs en **calcium échangeable** du sol sous jachère récente BP1 diminuent de $1,08 \text{ cmol.kg}^{-1}$ dans la couche 0-10 cm à $0,65 \text{ cmol.kg}^{-1}$ dans la couche 10-25 cm. Elles augmentent ensuite et atteignent $1,26 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en profondeur. Celles du sol cultivé avec une faible fumure organique sans labour BP2, varient dans le même sens de $0,89 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en surface à $1,68 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en profondeur ; le minimum à 10-25 cm est de $0,58 \text{ cmol.kg}^{-1}$. Dans le sol cultivé avec labour et forte fumure BP3 les teneurs vont de $1,70 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en surface à $1,53 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en passant par un minimum de $1,27 \text{ cmol.kg}^{-1}$ à 25-35 cm. La différence entre les trois profils concerne l'ensemble de l'horizon A (0-35 cm) où le sol BP2 montre des teneurs légèrement plus faibles par rapport à BP1. Dans BP3 par contre, il y a un enrichissement du sol représentant 57 % pour la couche 0-10 cm.

Concernant le **magnésium échangeable**, les profils présentent le même aspect que ceux du calcium. Les teneurs du sol BP1 augmentent de $0,35 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en surface à $0,92 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en profondeur en passant par un niveau plus faible ($0,31 \text{ cmol.kg}^{-1}$) à 10-25 cm. Dans le sol BP2 les teneurs varient dans le même sens de $0,47$ à $0,97 \text{ cmol.kg}^{-1}$ avec un minimum de $0,31 \text{ cmol.kg}^{-1}$ à 25-35 cm. Un profil semblable est observé dans le sol BP3 pour des teneurs variant de $0,76$ à $0,87 \text{ cmol.kg}^{-1}$ avec un minimum de $0,62 \text{ cmol.kg}^{-1}$. Comme pour le calcium échangeable, la différence entre les trois profils concerne tout l'horizon 0-35 cm. Sur les 25 premiers centimètres les teneurs en magnésium échangeable sont plus élevées dans le sol sous culture avec $\text{BP2} < \text{BP3}$. Dans la couche 0-10 cm cette augmentation, par rapport à BP1, est de 34 % pour BP2 alors que les teneurs sont multipliées par 2,6 pour BP3. Dans la couche 25-35 cm par contre, il y a une baisse des teneurs dans BP2 (57 %) et BP3 (14 %).

Pour le **potassium échangeable**, les teneurs des trois profils diminuent avec la profondeur. Elles sont plus faibles dans le sol BP1 ($0,31$ à $0,20 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et plus élevées dans le sol sous culture où elles varient de $0,55$ à $0,17 \text{ cmol.kg}^{-1}$ pour BP2 et de $0,92$ à $0,18 \text{ cmol.kg}^{-1}$ pour BP3. La culture continue avec fumure organique entraîne une augmentation des teneurs en potassium échangeable de l'horizon A (0-35 cm) par rapport au système de culture avec jachère de 5 ans BP1. Dans la couche 0-10 cm cette

augmentation est de 77 % pour BP2 alors que pour BP3, les teneurs sont 3 fois plus élevées.

5.2.2. Le pH

Le pH eau du sol BP1 est légèrement acide (6,2) dans la couche 0-10 cm et devient moyennement acide (5,6) en profondeur. Celui du sol BP2 varie dans la même gamme avec des valeurs légèrement plus élevées (6,4 à 5,6). Dans le sol BP3 le pH varie de neutre (7,1) dans les 25 premiers centimètres à très légèrement acide (6,6) entre 25-35 cm puis à moyennement acide (5,9) en profondeur.

Le pH KCl suit la même tendance. Dans le sol BP1, il diminue de 4,8 dans la couche 0-10 cm à 4,0 en profondeur. Les valeurs sont plus élevées pour le sol BP2 (5,3 à 4,2) et surtout pour le sol BP3 (6,1 à 4,3).

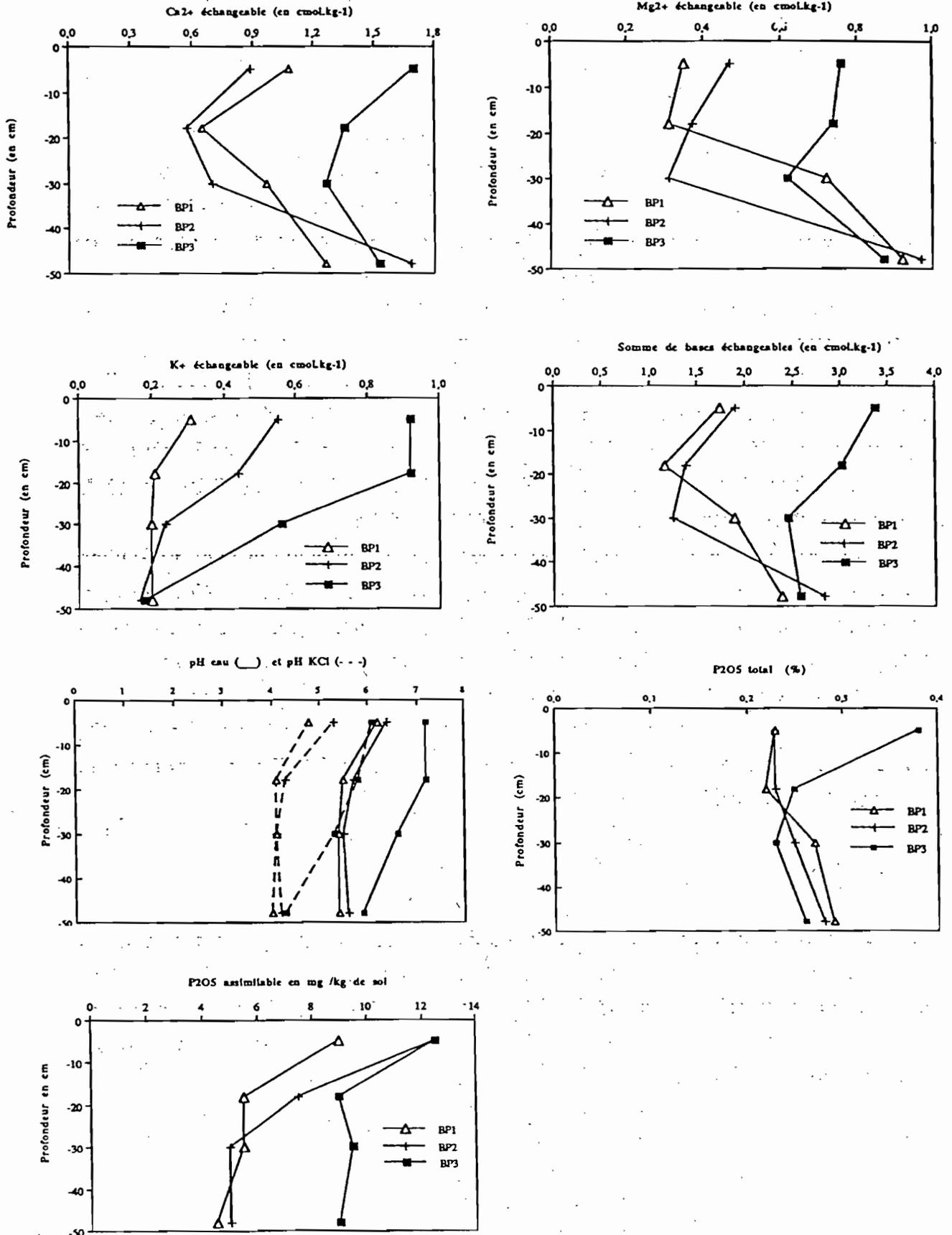
Ces résultats montrent une augmentation du pH sur l'horizon 0-35 cm du sol sous la culture continue avec une fumure organique par rapport à la jachère herbacée de 5 ans. Dans la couche 0-25 cm, cet accroissement est faible pour le BP2 (0,2 unité pH) et beaucoup plus important pour BP3 (1 à 1,7 unités pH).

5.2.3. Phosphore total et phosphore assimilable

Les teneurs en phosphore total sont comparables dans le sol BP1 (0,14 à 0,29 %) et dans le sol BP2 (0,23 à 0,28 %) où elles augmentent avec la profondeur. Dans le sol BP3 où le niveau est plus élevé, les teneurs diminuent de 0,38 % en surface à 0,26 % en profondeur. La différence entre les trois situations concerne la couche 0-10 cm où les teneurs de BP3 augmentent de 65 % par rapport à BP1 et BP2.

Concernant le phosphore assimilable, les teneurs diminuent avec la profondeur de 9 et 4,5 mg/kg de sol pour BP1 contre 12,5 à 5,0 mg/kg de sol pour BP2 et 12,5 à 9,0 mg/kg de sol pour BP3. L'augmentation des teneurs du sol sous culture par rapport à BP1, concerne seulement la couche 0-10 cm pour BP2 (32 %) et toute la couche 0-60 cm pour BP3 (32 % en surface et 100 % en profondeur).

Figure III.11 : Profils de pH et des teneurs en cations échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture



5.3. Sol de bas-fond

Les teneurs en bases échangeables, phosphore total et phosphore assimilable et le pH sont représentés par la figure III.12. Les données détaillées sont rassemblées en ANNEXE III.2

5.3.1. Bases échangeables

Les teneurs en **calcium échangeable** du sol sous forêt galerie dégradée BF1 diminuent de $4,26 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en surface à $2,26 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en profondeur. Celles du sol sous culture continue de sorgho BF2, plus faibles, augmentent avec la profondeur de $1,44$ à $2,44 \text{ cmol.kg}^{-1}$. La baisse des teneurs en calcium échangeable avec la mise en culture concerne l'horizon A (0-35 cm) et particulièrement la couche 0-10 cm où elle représente 67 %.

Les teneurs en **magnésium échangeable** diminuent avec la profondeur de $1,77$ à $1,20 \text{ cmol.kg}^{-1}$ dans le sol BF1 alors que celles du sol BF2, plus faibles, augmentent légèrement de $0,96$ à $1,05 \text{ cmol.kg}^{-1}$. La mise en culture entraîne donc la chute des teneurs en magnésium échangeable de l'horizon A. Dans la couche 0-10 cm où la différence est plus marquée cette baisse est de 46 % environ.

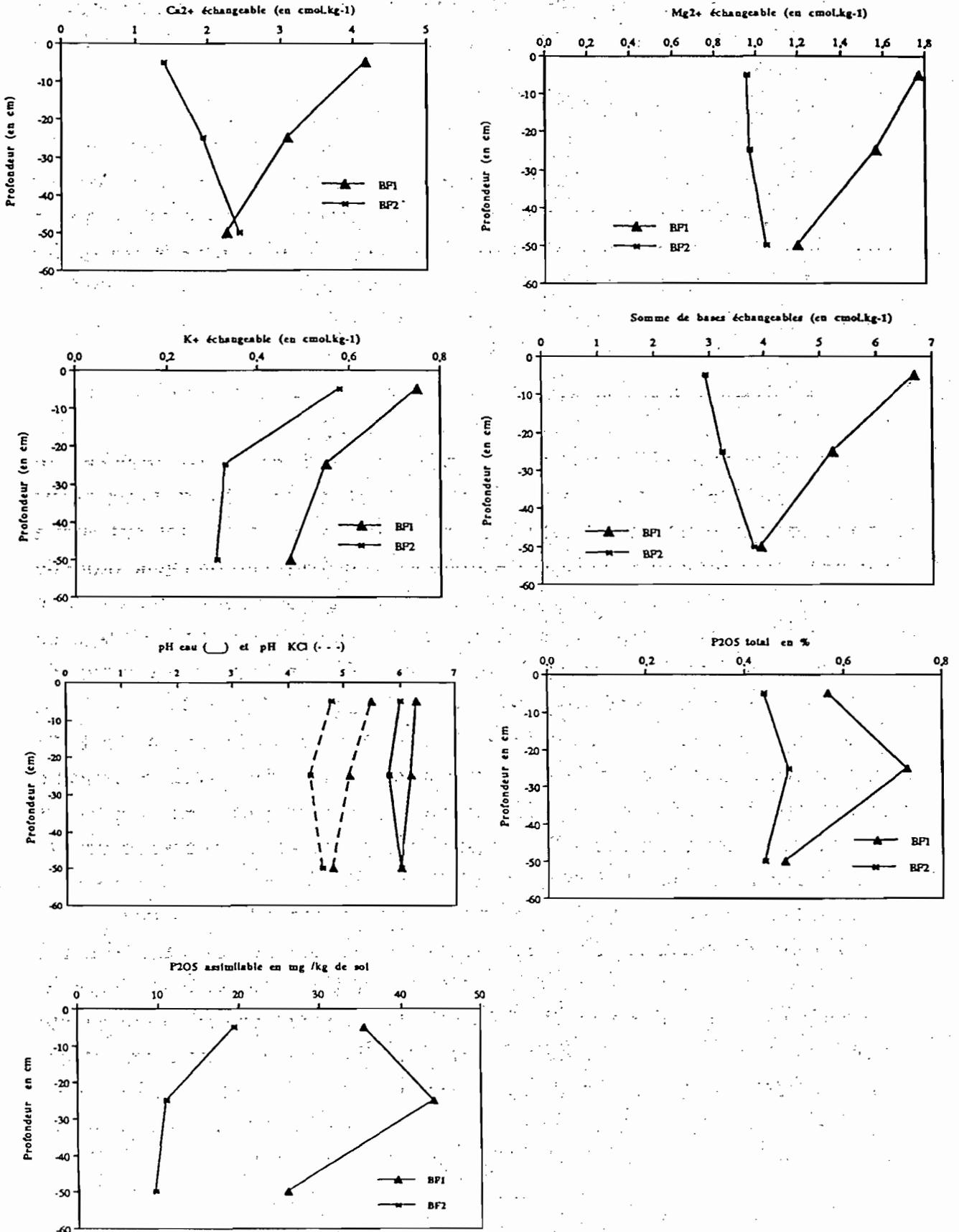
Concernant le **potassium échangeable**, les teneurs diminuent avec la profondeur et sont plus élevées dans le sol sous forêt galerie dégradée BF1 ($0,75$ à $0,47 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et plus faibles dans le sol sous culture BF2 ($0,58$ à $0,31 \text{ cmol.kg}^{-1}$). La chute des teneurs avec la mise en culture est de 22 % environ et concerne toute la couche 0-60 cm.

La **somme des bases échangeables** diminue de $6,68 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en surface à $3,93 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en profondeur pour le sol BF1 contre $2,94$ à $3,8 \text{ cmol.kg}^{-1}$ pour le sol BF2. Elle accuse une baisse de 56 % dans la couche 0-10 cm du sol BF2 par rapport au sol sous forêt galerie dégradée.

5.3.2. Le pH

Dans le sol sous forêt galerie dégradée BF1 le pH eau est légèrement acide ; il diminue de 6,3 en surface à 6,0 en profondeur. Celui du sol cultivé, sensiblement plus faible, varie dans le même sens de 6,0 à 5,8. Le pH KCl suit une tendance similaire avec 5,5 à 4,8 pour BF1 contre 4,8 à 4,5 pour BF2. Ces résultats montrent donc une tendance à l'acidification du sol de bas-fond sous culture continue de sorgho.

Figure III.12 : Profils de pH et des teneurs en cations échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture



5.3.3. Phosphore total et phosphore assimilable

Dans le sol sous forêt galerie dégradée BF1, les teneurs en phosphore total varient de 0,57 % en surface à 0,48 % en profondeur avec un ventre de 0,73 % entre 10 et 35 cm. Celles du sol cultivé BF2, plus faibles, varient peu dans le profil (0,45 à 0,49 %). On observe donc une chute des teneurs en phosphore total du sol, plus marquée dans l'horizon 0-35 cm (21 à 33 %).

Le profil de phosphore assimilable du sol BF1 présente le même aspect que celui du phosphore total avec des teneurs variant de 35,5 à 26,0 mg/kg de sol en passant par 44 mg/kg à 10-35 cm. Les teneurs du sol BF2 diminuent avec la profondeur de 19,5 à 9,5 mg/kg de sol. La baisse des teneurs en phosphore assimilable dans le sol cultivé concerne l'ensemble de la couche 0-60 cm en étant plus élevée dans la couche 10-35 cm (78 %).

5.4. Discussion et conclusion

En mi-pente, la différence entre les trois systèmes de culture concerne surtout l'horizon A (0-30 cm) mais elle est plus marquée dans la couche 0-10 cm. Les résultats montrent une baisse des teneurs en bases échangeables et du pH dans le sol sous culture continue par rapport à celui sous jachère arbustive. Cette baisse est du même ordre de grandeur dans le sol MP2 et le sol MP3 dont les caractéristiques sont semblables (31 et 33 % respectivement pour la somme des bases). La supériorité de la jachère s'explique par le fait qu'elle limite les exportations d'éléments minéraux par rapport à la culture de mil sans restitution organique. Cependant, le P_2O_5 assimilable le sol cultivé a des teneurs légèrement plus élevées que celles du sol de jachère ; la fumure minérale (25 kg/ha de NPK 15-20-25) apportée chaque année pourrait être à l'origine de cette différence. MP2 et MP3 présentent des caractéristiques chimiques assez comparables avec cependant des teneurs en K échangeable légèrement plus élevées dans la couche 0-20 cm de MP3. La faible différence entre MP2 et MP3 est liée au fait que les deux systèmes de culture sont semblables sur le plan de gestion des résidus organiques.

En bas de pente, les effets des systèmes de culture sur les caractéristiques chimiques sont bien marqués dans l'horizon A (0-35 cm). Les résultats montrent un effet non significatif de la jachère herbacée de 5 ans BP1 par rapport aux systèmes de culture continue avec une fumure organique (BP2 et BP3). Par contre l'effet favorable des apports organiques, rapporté par plusieurs auteurs (PICHOT, 1974 et 1979 ; SEDOGO, 1981 et GEIGER *et al.*, 1992), est confirmé. Il est d'autant plus net que les apports sont importants. En effet, les bases échangeables, le P_2O_5 total, le P_2O_5 assimilable et le pH

augmente de BP2 à BP3 recevant respectivement une faible fumure organique une année sur deux ou trois et une importante fumure organique par un parcage annuel du bétail. Par rapport au sol sous jachère herbacée de 5 ans, la somme des bases échangeables augmente de 7 % dans la couche 0-10 cm de BP2 et double dans celui de BP3. On peut noter particulièrement l'augmentation des teneurs en K échangeable dans les 25 premiers centimètres (0,31, 0,55 et 0,92 cmol.kg⁻¹ respectivement pour BP1, BP2 et BP3). A ce niveau le K échangeable devient plus important que Mg, avec un risque de déséquilibre pouvant empêcher l'assimilation du magnésium. L'abondance de K s'explique par le fait que les résidus de récoltes du mil et le fumier en contiennent beaucoup (cf. chapitre IX). L'accroissement du pH dans les 25 premiers centimètres du sol sous culture, est de 0,2 unité pour BP2 contre 1 à 1,7 pour BP3.

Dans le bas-fond, la mise en culture entraîne une baisse des caractères chimiques de l'horizon 0-35 cm. Dans la couche 0-10 cm, cette baisse représente 66, 45 et 22 % respectivement pour le Ca, Mg et K ; soit 56 % pour la somme des bases échangeables. Le P₂O₅ total et le P₂O₅ assimilable diminuent respectivement de 22 et 45 %. Par contre, la chute du pH avec la mise en culture est faible (0,3 unité). Ces résultats sont en accord avec ceux des travaux antérieurs (FAUCK *et al.*, 1969 ; BOYER, 1970 ; CHARREAU, 1972 ; SIBAND, 1972 et 1974 et PIERI, 1985 et 1989) qui montrent une baisse de la fertilité chimique des sols sous l'influence de la culture continue sans restitutions organiques.

Cependant, il faut noter que pour chaque sol, l'analyse statistique des résultats (ANNEXE III.2) ne révèle de différences significatives entre les systèmes de culture pour l'ensemble des paramètres étudiés.

6. CONCLUSION

Les résultats montrent que pour chaque sol, les systèmes de culture n'entraînent pas de modifications texturales importantes sur la profondeur observée. Ce qui donne plus de signification aux effets sur les autres caractères.

En mi-pente l'horizon de surface du **sol ferrugineux peu lessivé** a une structure plus ou moins litée quel que soit le système de culture. Le processus est accentué dans les systèmes de culture comportant un labour. La richesse chimique diminue du sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1 au sol sous culture. Cette baisse qui concerne surtout la couche 0-10 cm, est plus importante pour le carbone organique et l'azote totaux (40 à 50 %) et relativement plus faible pour les bases échangeables (31 à 33 %) ainsi que pour le pH (0,2 unité). Sous culture, le sol cultivé sans labour ni aménagement MP2 et le sol cultivé avec labour et aménagement antiérosif MP3 ont des caractères (azote total, bases échangeables, phosphore et pH) assez comparables à l'exception des teneurs en

carbone organique total qui sont légèrement plus élevées dans MP3. Les teneurs en carbone organique total relativement plus élevées dans MP3 par rapport à MP2, s'expliqueraient par l'effet favorable du labour et de l'aménagement antiérosif sur le développement racinaire.

Pour le sol ferrugineux tropical lessivé mal drainé en profondeur (en bas de pente), les modifications morphologiques se caractérisent par une augmentation de la compacité de l'horizon de surface. Le phénomène est accentué dans le système de culture comportant un labour annuel (BP3). Par contre, on observe une certaine amélioration de la structure dans la zone racinaire du sol sous jachère récente. Concernant les caractères chimiques, la culture continue de mil avec fumure organique entraîne une augmentation des teneurs par rapport à la jachère BP1. Cette augmentation concerne la couche 0-10 cm pour les teneurs en carbone organique total, azote total et phosphore total et tout l'horizon A (0-35 cm) pour les bases échangeables, le phosphore assimilable et le pH. Elle est proportionnelle à l'importance des apports organiques (BP2 < BP3). Dans la couche 0-10 cm du sol recevant une faible fumure organique (BP2), l'augmentation des teneurs par rapport à BP1 est de l'ordre de 25 % pour le carbone organique total et de 7 % pour la somme des bases tandis que le pH croît de 0,2 unité. Dans celui du sol recevant une forte fumure (BP3), les teneurs en carbone organique et azote totaux augmentent de 60 à 70 %, celles en bases échangeables et phosphore total sont multipliées par 2 pendant que le pH monte de 1,1 unité.

Dans le bas-fond, l'horizon A du sol hydromorphe à pseudogley sous forêt galerie dégradée BF1 a une forte teneur en débris organiques de nature diverse que n'a pas ou peu celui du sol cultivé (BF2). Sur le plan chimique, la culture continue de sorgho entraîne une baisse des teneurs dans l'horizon A (0-35 cm) par rapport au sol sous forêt galerie. Dans la couche 0-10 cm, les teneurs en carbone organique et azote totaux diminuent de 48 à 59 %, celles des bases échangeables et en phosphore de 56 % et 22 % respectivement et le pH baisse plus faiblement (0,3 unité).

De l'ensemble des résultats obtenus pour les trois sols étudiés se dégagent les points suivants :

- Les effets des systèmes de culture sur les caractères morphologiques et chimiques concernent l'horizon A et surtout la couche 0-10 cm.

- Sur le plan morphologique, la mise en culture semble entraîner d'une façon générale et quel que soit le système de culture, la formation d'un volume massif et cohérent à la base de la couche travaillée. L'importance de ce volume et son degré de cohésion augmentent lorsque le labour est fréquemment réalisé. Les deux sols ferrugineux de versant semblent plus sensibles à ce phénomène de prise en masse et de

tassement, sans doute en raison de leur texture relativement sableuse et de leur pauvreté en matière organique.

- Concernant les caractères chimiques, les résultats confirment l'effet favorable de la jachère de longue durée sur les teneurs en carbone organique total, azote total, phosphore total et pH du sol par rapport à la culture continue. Cela s'explique par le double rôle de la végétation comme source de résidus organiques et comme protecteur du sol contre l'érosion. La jachère herbacée de 5 ans par contre, en ne couvrant pas suffisamment le sol et en produisant peu de résidus végétaux, a une action peu marquée par rapport à la culture continue avec fumure organique. Par ailleurs les systèmes de culture comportant une fumure organique ont un effet favorable sur les caractères chimiques. Mais l'effet de fumure organique n'est net que lorsque les apports organiques sont importants et réguliers.

D'une façon générale, les niveaux minéral et organique de chacun des sols étudiés augmentent avec l'importance des restitutions organiques (naturellement ou par la fumure organique). Dans le chapitre suivant, seront étudiés les effets des systèmes de culture sur les caractéristiques de la matière organique des horizons de surface (0-10 cm).

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LA REPARTITION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES DES SOLS

La matière organique des sols est constituée de la *matière organique libre* formée de débris végétaux à divers stades de décomposition, juxtaposés aux constituants minéraux, et de la *matière organique liée* à la matière minérale dans des complexes organo-minéraux. Elle se retrouve donc dans les différentes classes granulométriques du sol avec des propriétés physiques, chimiques et biologiques différentes (BRUCKERT et KILBERTUS, 1980 ; BERNHARD-REVERSAT, 1981 ; MARION *et al.* 1981 ; FELLER *et al.*, 1983 ; BALESSENT *et al.*, 1988 ; FELLER *et al.*, 1991a et b ; DJEGUI, 1992).

Les résultats du chapitre III ont révélé que les systèmes de culture affectent le niveau organique des sols caractérisé par les teneurs en carbone organique et azote totaux. La couche de surface est la plus marquée par ces modifications.

L'objet de ce chapitre est d'étudier, à travers un fractionnement granulométrique d'échantillons de sol, l'influence des systèmes de culture sur l'évolution qualitative de la matière organique en considérant la répartition du carbone organique total et de l'azote total dans deux fractions granulométriques (2000/50 et <50 μm) dans la couche 0-10 cm des sols. Après une description de la méthodologie utilisée, nous présenterons les résultats concernant les caractéristiques (teneurs en carbone organique et azote totaux et C/N) et les stocks organiques correspondant à ces deux fractions granulométriques.

1. METHODOLOGIE

1.1. Prélèvement des échantillons

Dans chacune des parcelles d'étude, décrites précédemment, 25 sous-parcelles de 3 x 3 m ont été délimitées. A l'aide d'un tube de prélèvement de 49 mm de diamètre, une carotte est prélevée dans chaque sous-parcelle pour constituer un échantillon composite de l'horizon de surface (0-10 cm). Les prélèvements ont eu lieu en début de la saison des pluies. La variabilité de l'échantillonnage est étudiée avec 4 répétitions de

l'échantillon composite. Les variations des teneurs en carbone organique et azote totaux (tableau IV.1) sont relativement faibles. Les coefficients de variation sont inférieurs à 10 %.

Tableau IV.1 : Variation des teneurs en carbone organique et azote totaux et du pH dans l'échantillon composite.

Caractéristiques analytiques	Nombre de répétitions	Moyenne	Ecart type	Intervalle de confiance à 95 %
MP1				
Ctotal en %	4	0,42	0,027	± 0,04
Ntotal en ‰	4	0,373	0,029	± 0,05
pH eau	4	6,2	0,05	± 0,07
MP2				
Ctotal en %	4	0,21	0,01	± 0,02
Ntotal en ‰	4	0,20	0,02	± 0,03
pH eau	4	5,7	0,02	± 0,03

1.2. Fractionnement granulométrique de la matière organique

Le fractionnement granulométrique permet la séparation mécanique des fractions en vue de leur étude ultérieure (morphologique, physique, chimique et biologique). L'intérêt du fractionnement réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en oeuvre, dans son action peu dénaturante et dans son efficacité car il permet d'obtenir des fractions organiques très différentes quant à leur morphologie, leur composition chimique et leur dynamique (FELLER *et al.*, 1983 ; FRANCOIS, 1988). Les méthodes de fractionnement utilisées varient en fonction de la nature du sol et de l'objectif poursuivi. Mais quelle que soit la méthode, l'essentiel est d'arriver à une bonne dispersion du sol qui permette une séparation optimale des fractions organiques à étudier sans les détruire ni les dénaturer.

La méthode utilisée ici s'inspire de celle proposée par FELLER (1979) pour les sols riches en sables. Après 2 heures d'agitation de 30 g de sol dans 100 ml d'eau en présence de 3 billes de verre de 1,5 cm de diamètre, l'échantillon de sol est réparti, par tamisage sous l'eau, successivement en deux fractions granulométriques : une fraction grossière comprise entre 2000 et 50 μm et une fraction fine inférieure à 50 μm . Après séchage à 60 °C, les teneurs en carbone organique et en azote totaux sont déterminées

selon les méthodes précitées (chapitre III). Le fractionnement est réalisé en double exemplaire pour chaque échantillon composite des 8 parcelles étudiées.

Les résultats sont exprimés en **mg/g de fraction** (*teneurs*) pour désigner les teneurs en carbone organique total ou azote total des fractions et en **mg/g de sol** (*contenus*) pour désigner les quantités de carbone organique total ou d'azote total stockées dans ces fractions.

2. RESULTATS

2.1. Bilans en masse, en carbone total et en azote total

Les bilans permettent d'apprécier la qualité du fractionnement. On compare ainsi la masse et les contenus en carbone organique et azote totaux du sol fractionné et ceux du sol non fractionné. Pour le sol fractionné, les teneurs en carbone organique et azote total et le pourcentage de poids sont la somme de ceux des différentes fractions.

Ces comparaisons permettent une appréciation de la qualité du fractionnement. Toutes situations confondues (tableau IV.2), les bilans en masse varient entre 98,1 et 99,9 % et ceux de carbone organique et azote totaux vont respectivement de 91,3 à 105,4 % et de 93,6 à 105,6 %.

D'une façon générale, ces bilans sont satisfaisants (FELLER, 1979, FELLER *et al.*, 1983, FRANCOIS, 1988).

2.2. Caractéristiques chimiques des fractions

Les teneurs en carbone organique total (mg/g de fraction) en azote total (mg/g de fraction) et le rapport C/N des fractions sont rassemblés dans les tableaux IV.3 et IV.4.

2.2.1. Fraction grossière (2000/50 μm)

Les teneurs en carbone organique et azote totaux de la fraction grossière sont variables en fonction du type de sol et des situations pour un sol donné. En mi-pente elles sont plus élevées dans le sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1 et diminuent dans le sol cultivé (MP2 et MP3) de 65 et 46 % pour le carbone organique total et de 26 et 33 % pour l'azote total. En bas de pente, par rapport au sol sous jachère herbacée de 5 ans BP1, les teneurs en carbone organique total augmentent de 81 % dans BP2 et sont multipliées par 2 dans BP3 alors que celles de l'azote total croissent, dans le même

ordre, de 20 et 30 %. Enfin, dans le bas-fond, les teneurs en carbone organique et azote totaux des fractions dans le sol sous forêt galerie dégradée BF1, diminuent respectivement de 58 et 31 % dans le sol cultivé BF2.

Le rapport C/N de la fraction grossière est plus élevé et plus variable en fonction des situations que celui de la fraction fine. En mi-pente, il est de 19 dans le sol sous jachère MP1 et diminue à 14 dans le sol cultivé MP3. En bas de pente le rapport C/N des fractions augmente du sol sous jachère herbacée de 5 ans (17) au sol cultivé BP3 (38) en passant par le sol BP2 (25). Dans le bas-fond, le rapport C/N de 37 dans le sol sous forêt galerie dégradée chute à 28 dans le sol cultivé. D'une façon générale le rapport C/N de la fraction grossière tend à augmenter avec les teneurs en matière organique des sols.

2.2.2. Fraction fine (<50 μm)

Les teneurs en carbone organique et azote totaux de la fraction fine sont, d'une façon générale, plus élevées que celles de la fraction grossière. Mais, comme ces dernières, elles présentent le même sens de variation en fonction des systèmes de culture. En mi-pente, les teneurs en carbone organique et azote totaux des fractions dans le sol sous jachère arbustive de 15 ans, diminuent dans le sol cultivé (MP2 et MP3) respectivement de 23 % et de 38 et 50 %. En bas de pente, les teneurs dans le sol cultivé (BP2 et BP3) augmentent de 17 et 20 % pour le carbone organique total et de 11 et 67 % pour l'azote total, par rapport au sol sous jachère BP1. Concernant le bas-fond, les teneurs en carbone organique et azote totaux dans le sol cultivé baissent respectivement de 25 et 31 % par rapport au sol sous forêt galerie dégradée.

Dans la quasi-totalité des situations le rapport C/N de la fraction fine est inférieur à 10. Les variations entre type de sol et entre systèmes de culture sont plus faibles que celles observées pour la fraction grossière. En mi-pente le rapport C/N tend à augmenter dans le sol cultivé (8,4 pour MP1 à 11,8 pour MP3 en passant par 9,5 pour MP2). En bas de pente il diminue de BP1 (9,2) à BP3 (6,3). Concernant le sol de bas-fond le rapport C/N de la fraction diminue faiblement de BF1 (8,2) à BF1 (7).

Tableau IV.2 : Bilan du fractionnement granulométrique (masse, carbone et azote total)

Bilan	Fraction taille en μm	Sol de mi-pente			Sol de bas de pente			Sol de bas-fond	
		MP1	MP2	MP3	BP1	BP2	BP3	BF1	BF2
Masse % de sol	2000/50 <50	85,5 13,8	84,2 15,1	82,9 15,4	76,4 23,2	77,2 22,1	78,9 21,0	46,4 52,6	36,3 63,3
	Sol fractionné	99,3	99,3	98,1	99,6	99,3	99,9	98,9	99,6
	Sol non fractionné	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C total mg/g de sol	2000/50 <50	2,2 1,7	0,7 1,4	1,2 1,4	1,1 1,8	2,0 1,9	2,4 1,9	6,9 6,7	2,3 6,0
	Sol fractionné	4,1	2,1	2,6	2,8	3,9	4,3	13,6	8,3
	Sol non fractionné	4,2	2,3	2,6	2,9	3,7	4,5	14,5	8,4
Ntotal mg/g sol	2000/50 <50	0,09 0,28	0,09 0,12	0,08 0,15	0,05 0,21	0,08 0,22	0,09 0,31	0,19 0,83	0,08 0,67
	Sol fractionné	0,37	0,21	0,23	0,26	0,30	0,40	1,02	0,75
	Sol non fractionné	0,38	0,22	0,23	0,26	0,30	0,42	1,09	0,71

Tableau IV.3 : Teneurs (mg/g de fraction) et contenus (mg/g de sol) en carbone des fractions granulométriques des sols en fonction des systèmes de culture.

Sol de mi-pente							
Systèmes de culture	Fractions taille en μm	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ctotal	ΔC mg/g de sol	$\Delta\text{C}/\Delta\text{Ct}$ en %	C/N
MP1	2000/50 <50	2,6	2,2	56			19,0
		12,2	1,7	44			8,4
MP2	2000/50 <50	0,9	0,7	33	- 1,5	- 83	8,1
		9,5	1,4	67	- 0,3	- 17	9,5
MP3	2000/50 <50	1,4	1,2	46	- 1,0	- 77	13,7
		9,4	1,4	54	- 0,3	- 23	9,4

Sol de bas de pente							
Systèmes de culture	Fractions taille en μm	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ctotal	ΔC mg/g de sol	$\Delta\text{C}/\Delta\text{Ct}$ en %	C/N
BP1	2000/50 <50	1,4	1,1	38			17,0
		7,6	1,8	62			9,2
BP2	2000/50 <50	2,5	2,0	51	+ 0,9	+ 90	25,0
		8,9	1,9	49	+ 0,1	+ 10	8,3
BP3	2000/50 <50	3,0	2,4	56	+ 1,3	+ 93	38,0
		9,1	1,9	44	+ 0,1	+ 7	6,3

Sol de bas-fond							
Systèmes de culture	Fractions taille en μm	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ctotal	ΔC mg/g de sol	$\Delta\text{C}/\Delta\text{Ct}$ en %	C/N
BF1	2000/50 <50	14,9	6,9	51			37,3
		12,6	6,7	49			8,2
BF2	2000/50 <50	6,2	2,3	28	- 4,6	- 87	28,2
		9,4	6,0	72	- 0,7	- 13	7,0

ΔC représente dans chaque situation, la différence de contenus en carbone organique total entre les fractions du sol sous jachère et fractions du sol cultivé.

ΔCt est la somme des ΔC des deux fractions.

Tableau IV.4: Teneurs (mg/g de fraction) et contenus (mg/g de sol) en azote des fractions granulométriques des sols en fonction des systèmes de culture.

Sol de mi-pente							
Systèmes de culture	Fractions taille en μm	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ntotal	ΔN mg/g de sol	$\Delta\text{N}/\Delta\text{Nt}$ en %	C/N
MP1	2000/50 <50	0,15	0,15	37			19,0
		1,60	0,22	63			8,4
MP2	2000/50 <50	0,11	0,09	45	- 0,06	- 38	8,1
		1,0	0,12	55	- 0,10	- 62	9,5
MP3	2000/50 <50	0,10	0,08	35	- 0,07	- 50	13,7
		0,80	0,15	65	- 0,07	- 50	11,8

Sol de bas de pente							
Systèmes de culture	Fractions taille en μm	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ntotal	ΔN mg/g de sol	$\Delta\text{N}/\Delta\text{Nt}$ en %	C/N
BP1	2000/50 <50	0,08	0,05	19			17,0
		0,90	0,21	81			9,2
BP2	2000/50 <50	0,10	0,08	27	+ 0,03	+ 75	25,0
		1,00	0,22	73	+ 0,01	+ 25	8,3
BP3	2000/50 <50	0,11	0,09	23	+ 0,04	+ 29	38,0
		1,5	0,31	77	+ 0,10	+ 71	6,3

Sol de bas-fond							
Systèmes de culture	Fractions taille en μm	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ntotal	ΔN mg/g de sol	$\Delta\text{N}/\Delta\text{Nt}$ en %	C/N
BF1	2000/50 <50	0,40	0,19	19			37,3
		1,60	0,83	81			8,2
BF2	2000/50 <50	0,22	0,08	11	- 0,11	- 41	28,2
		1,10	0,67	89	- 0,16	- 59	7,0

ΔN représente dans chaque situation, la différence de contenus en azote total entre les fractions du sol sous jachère et fractions du sol cultivé.

ΔNt est la somme des ΔN des deux fractions.

2.3. Répartition du carbone organique total et de l'azote total des sols dans les fractions

Les contenus en carbone organique total (mg/g de sol) et en azote total (mg/g de sol) des fractions regroupés dans les tableaux IV.3 et IV.4., sont illustrés par les figures IV.1 et IV.2.

2.3.1. Carbone organique total

Dans les sols sous jachère arbustive de 15 ans MP1 en mi-pente, sous forêt galerie dégradée BF1 dans le bas-fond et sous culture avec une fumure organique (BP2 et BP3) en bas de pente, plus de la moitié du carbone organique total du sol (51 à 56 %) se trouve dans la fraction grossière. Alors que dans les sols cultivés de mi-pente (MP2 et MP3) et de bas-fond (BF2) et dans le sol sous jachère de 5 ans de bas de pente (BP1), c'est la fraction fine qui contient la plus grande partie du carbone organique total du sol (54 à 73 %). Mais ce sont les contenus en carbone organique de la fraction grossière qui varient le plus en fonction des systèmes de culture.

En mi-pente, la différence entre le sol sous jachère arbustive MP1 ayant les forts contenus et le sol sous culture MP2 et MP3, est respectivement de 1,5 et 1,0 mg/g de sol pour la fraction grossière contre seulement 0,3 mg/g de sol pour la fraction fine. Ce qui représente une baisse des contenus en carbone organique total dans le sol cultivé de 68 et 45 % pour la fraction 2000/50 et de 18 % pour la fraction fine. La différence entre MP2 et MP3 porte essentiellement sur les contenus de la fraction 2000/50 μm qui sont plus élevés dans MP3 de 0,5 mg/g de sol.

Dans le bas-fond également, la baisse des contenus en carbone organique total dans le sol cultivé BF2 par rapport au sol sous forêt galerie dégradée BF1 est de 4,6 mg/g de sol pour la fraction grossière contre 0,6 mg/g de sol pour la fraction fine ; soit respectivement 67 % contre 9 %.

En bas de pente, par rapport au sol sous jachère BP1, les contenus en carbone organique total de la fraction 2000/50 μm dans le sol cultivé, augmentent de 0,9 et 1,3 mg/g de sol respectivement pour BP2 et BP3. Cela représente, dans le même ordre, 81 % et 2 fois les valeurs de BP1. Pour la fraction fine l'augmentation n'est que de 0,1 mg/g de sol, soit seulement 6 % des contenus de BP1.

Les résultats confirment que les contenus en carbone organique total de la fraction grossière sont les plus modifiés par les systèmes de culture alors que les contenus de fraction fine sont relativement stables. La part de la fraction grossière dans l'augmentation (sol de bas de pente) ou la diminution (sol de mi-pente et de bas-fond)

des contenus par rapport au témoin, représente 77 à 93 % alors que celle de fraction fine varie entre 7 et 23 %.

2.3.2. Azote total

Contrairement au carbone organique total, une très grande partie de l'azote total du sol (55 à 89 %) se trouve dans la fraction fine quel que soit le système de culture. Les effets des systèmes de culture concernent toutes les fractions.

En mi-pente, la différence entre le sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1 dont les contenus sont plus élevés et le sol sous culture MP2 et MP3 est de 0,06 et 0,07 mg/g de sol pour la fraction grossière contre 0,10 et 0,07 mg/g de sol pour la fraction fine. Par rapport à MP1, la baisse des contenus dans le sol MP2 est du même ordre pour les deux fractions (40 % pour 2000/50 μm contre 45 % pour <50 μm) alors que dans le sol MP3 elle est relativement plus élevée pour la fraction grossière (46 %) que la fraction fine (32 %). La différence entre MP2 et MP3 concerne surtout la fraction fine (0,03 mg/g de sol de plus dans MP3).

Dans le bas-fond, les écarts entre le sol sous forêt galerie dégradée BF1 et le sol cultivé BF2 sont de 0,11 mg/g de sol pour la fraction grossière et de 0,16 mg/g de sol pour la fraction fine. La chute des contenus dans le sol cultivé BF2, par rapport au sol sous forêt galerie BF1, représente 57 et 20 % respectivement pour les fractions 2000/50 μm et <50 μm .

En bas de pente, les contenus en azote total dans le sol sous culture (BP2 et BP3) augmentent de 0,03 et 0,04 mg/g de sol pour la fraction grossière et de 0,01 et 0,10 mg/g de sol pour la fraction fine, par rapport au sol sous jachère herbacée de 5 ans. L'augmentation des contenus en azote total des fractions dans le sol cultivé (BP2 et BP3) est plus importante pour la fraction 2000/50 μm (60 % pour BP2 et 80 % pour BP3) que pour la fraction <50 μm (5 % pour BP2 et 48 % pour BP3). Mais la différence entre BP2 et BP3 porte sur la fraction fine avec 0,09 mg/g de sol de plus dans BP3.

Ces résultats montrent que les systèmes de culture modifient les contenus en azote total de toutes les fractions et surtout ceux de fraction fine. Dans les sols cultivés de mi-pente et de bas-fond, la part de la fraction fine dans la baisse des contenus par rapport aux sols sous jachère, varie de 50 à 62 % alors que la part de fraction grossière est comprise entre 38 et 50 %. En bas de pente, 71 % l'augmentation des contenus en azote total dans le sol cultivé BP3 est due à la fraction grossière contre 29 % pour la fraction fine ; c'est l'inverse dans le sol BP2 où les contenus de la fraction grossière représente 75 % de l'augmentation contre 25 % pour la fraction fine. Ceci s'explique par la tendance à l'accumulation de l'azote dans la fraction fine et par la relative stabilité de la matière organique de cette dernière.

Figure IV.1 : Contenus en carbone organique total dans les fractions granulométriques de l'horizon 0-10 cm des sols en fonction des systèmes de culture.

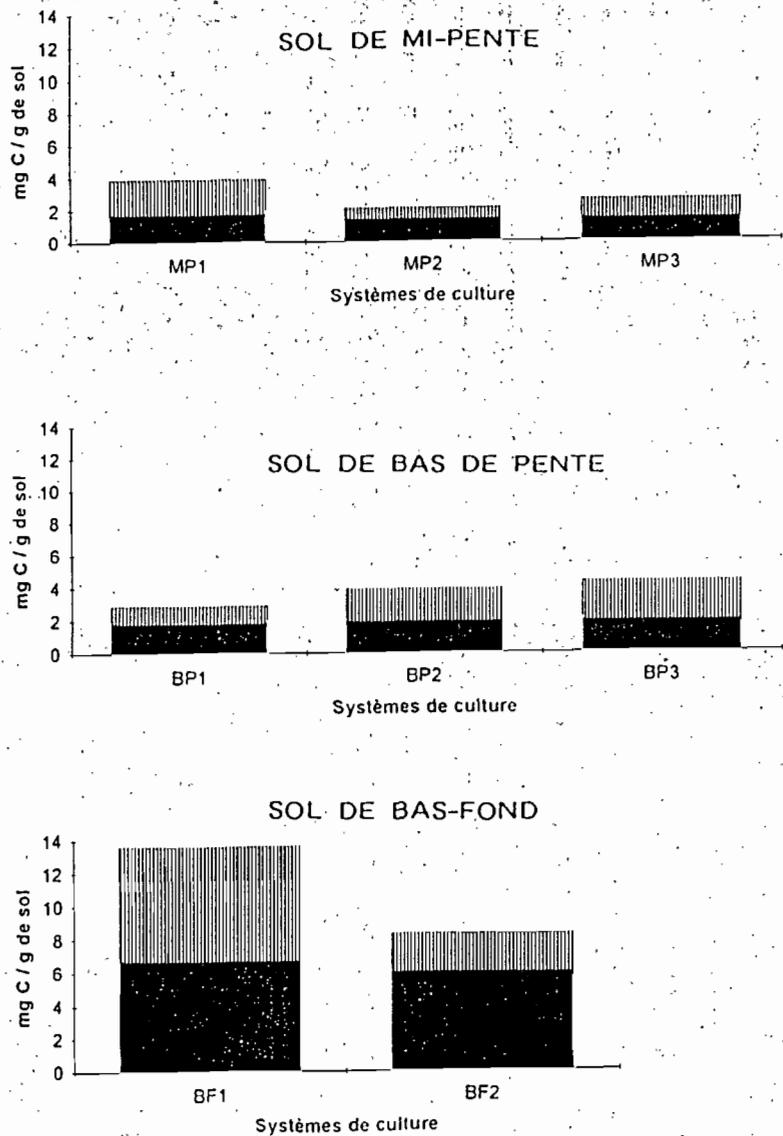
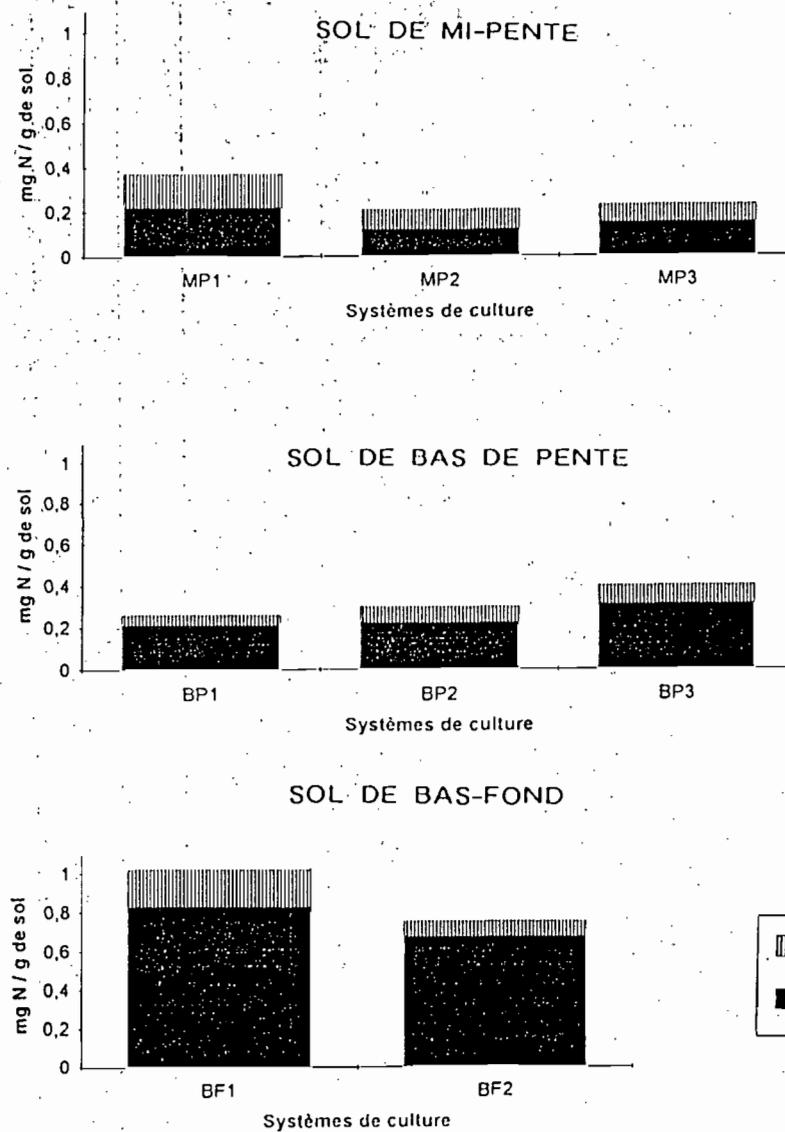


Figure IV.2 : Contenus en azote total dans les fractions granulométriques de l'horizon 0-10 cm des sols en fonction des systèmes de culture.



▨ 2000/50 μm
 ■ < 50 μm

3. DISCUSSION

Les contenus en carbone organique et azote totaux (mg/g de sol) dépendent des teneurs (en mg/g de fraction) et de la proportion relative (en poids) de la fraction dans le sol. Or pour chaque sol, le bilan du fractionnement (tableau IV.1) montre que le poids des fractions est peu ou pas modifié par les systèmes de culture. La variation des contenus est donc due essentiellement à celle des teneurs qui, nous venons de le voir, sont influencées par les systèmes de culture.

Les résultats confirment que la matière organique des fractions se caractérise par un rapport C/N diminuant avec la taille de la fraction. Cela est conforme avec les mécanismes d'incorporation de la matière organique dans les différentes fractions du sol. En effet, la matière organique est incorporée généralement sous forme de résidus grossiers dans la fraction grossière du sol (2000/50 μm) ; elle est constituée essentiellement de débris végétaux à rapport C/N élevé (14 à 38), reconnaissables à la loupe binoculaire (graines d'adventices, morceaux de paille, brindilles, de charbon de bois, racines, etc..., à divers stades de décomposition). Par contre la matière organique de la fraction fine à rapport C/N bas (6 à 12), provient de la transformation de la matière organique de la fraction grossière ; elle est composée essentiellement de molécules organiques amorphes, de résidus microbiens et de substances humiques associées aux minéraux (FELLER, 1979 ; FELLER *et al.*, 1983 et 1991 et DJEGUI, 1992). D'après MARION *et al.* (1981), BALESSENT *et al.* (1988), la matière organique grossière a un taux de renouvellement plus élevé que celui de la fraction fine. Ce qui expliquerait la plus grande variation de la fraction grossière.

La variation des teneurs et contenus en carbone organique et azote totaux des fractions en fonction des systèmes de culture semble être étroitement liée au niveau des restitutions organiques. Dans les sols cultivés de mi-pente (MP2 et MP3) et de bas-fond (BF2), la baisse des teneurs et contenus en carbone organique et azote totaux des fractions par rapport à ceux du sol sous jachère arbustive de 15 ans (MP1) ou sous forêt galerie dégradée (BF1), peut être attribuée à la faiblesse des restitutions organiques. C'est aussi l'effet des apports organiques qui explique l'augmentation des teneurs et contenus en carbone organique et azote totaux des fractions dans le sol cultivé de bas de pente (BP2 et BP3) par rapport au sol sous jachère herbacée de 5 ans (BP1).

Outre le niveau des restitutions organiques, l'accumulation de la matière organique dans les fractions peut s'expliquer par les processus de transformation du carbone et de l'azote, variables suivant les conditions pédoclimatiques. On sait que dans un sol fonctionnant normalement, la dégradation de la matière organique conduit à une perte de carbone sous forme de CO_2 alors que les processus de minéralisation-

réorganisation sont plus favorables au transfert de l'azote vers la fraction fine. Aussi l'azote minéral libéré lors de la décomposition de la matière organique de fraction grossière à C/N élevé, peut-il être réorganisé par les microorganismes au profit de la fraction fine (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; CAMERON et POSNER, 1979 et SORENSEN, 1980). Ceci explique l'augmentation des teneurs et contenus en azote total de fraction fine dans les sols relativement riche en matière organique.

4. CONCLUSION

Le fractionnement granulométrique a permis de séparer la matière organique du sol en deux fractions granulométriques distinctes : la matière organique grossière labile associée à la fraction sableuse (2000/50 μm) avec un rapport C/N élevé (14 à 38) et la matière organique fine relativement plus stable associée à la fraction argilo-limoneuse (<50 μm) caractérisée par un-rapport C/N bas (6,3 à 12).

L'importance de chaque fraction dépend du niveau des restitutions de résidus organiques. Dans les situations où il y a plus de restitutions organiques (sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1, sol sous forêt galerie dégradée BF1 et sol cultivé avec fumure organique BP2 et BP3), plus de la moitié du carbone organique total (51 à 56 %) se trouve dans la fraction grossière. Par contre, dans les cas où les apports organiques sont plus réduits (sol cultivé en mi-pente MP2 et MP3, sol cultivé de bas-fond BF2 et sol sous jachère herbacée de 5 ans en bas de pente BP1), c'est la fraction fine qui contient la plus grande partie du carbone organique (56 à 73 %). Mais concernant l'azote total, quelle que soit la situation, 68 à 89 % de l'azote du sol sont contenus dans la fraction fine.

Les systèmes de culture modifient les teneurs et contenus en carbone organique et azote totaux des fractions dans le même sens que les teneurs des sols. En effet, les résultats montrent une baisse des teneurs et contenus des fractions dans les sols cultivés sans fumure organique (MP2, MP3 en mi-pente et BF2 dans le bas-fond) par rapport aux sols sous jachère arbustive (MP1 en mi-pente) et sous forêt galerie dégradée (BF1 dans le bas-fond). Inversement, la fumure organique entraîne, proportionnellement à l'importance des apports, une augmentation des teneurs et contenus des fractions.

Toutefois, les modifications montrent des différences entre le carbone et l'azote suivant la fraction considérée. Pour le carbone organique total, 77 à 93 % des variations des teneurs des sols cultivés par rapport aux témoins, sont dues à la fraction grossière contre seulement que 7 à 23 % pour la fraction fine. Concernant l'azote total par contre, toutes les fractions sont concernées au même chef ; la part de fraction grossière varie de 29 à 75 % contre 25 à 71 % pour la fraction fine. Cela s'explique par les processus de

minéralisation-réorganisation pouvant conduire à un transfert d'azote de la fraction grossière vers la fraction fine.

La répartition de la matière organique dans les fractions avec des caractéristiques différentes (rapport C/N) pourrait affecter le comportement du sol notamment son aptitude à la minéralisation du carbone et de l'azote et sa capacité à assurer les besoins azotés des plantes. L'influence des systèmes de culture sur la minéralisation du carbone et de l'azote des sols sera étudiée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V

INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LE POUVOIR MINERALISATEUR DES SOLS

Les microorganismes (bactéries, champignons et actinomycètes) du sol tirent leur énergie et les éléments nutritifs de la dégradation de la matière organique. Les processus de transformation du carbone organique aboutissent, à terme, à une libération de dioxyde de carbone (CO_2). Dans le cas de l'azote organique, les produits finaux sont l'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-).

La minéralisation du carbone et/ou de l'azote exprime le pouvoir minéralisateur des sols (DOMMERGUES, 1960 ; MOUREAUX, 1968 ; FAUCK *et al.*, 1969 ; BACHELIER, 1973 ; REMY et MARY, 1977 et DELPHIN, 1986 et 1989). Elle dépend d'une part de conditions liées au climat (température et humidité) et d'autre part de facteurs et conditions liés au sol (texture, matières organiques, pH, nature et importance de la microflore). DELPHIN (1991) montre que les caractéristiques de la matière organique des sols jouent un rôle déterminant dans l'expression du pouvoir minéralisateur. Or les chapitres III et IV ont montré, pour des échantillons de la couche 0-10 cm, que les systèmes de culture entraînent une modification quantitative et qualitative de la matière organique des sols.

L'objectif du présent chapitre est donc d'étudier l'influence des systèmes de culture sur la minéralisation du carbone organique (dégagement du CO_2) et sur la minéralisation nette de l'azote. Avant de présenter les différents résultats, nous exposerons les méthodes utilisées.

1. METHODOLOGIE

Les échantillons de sol, prélevés dans l'horizon de surface (0-10 cm), sont les mêmes que ceux utilisés dans le chapitre IV.

1.1. Minéralisation du carbone

La minéralisation du carbone est estimée en mesurant le CO_2 dégagé par respiration d'un échantillon de sol incubé. La méthode utilisée est celle qu'a décrit

DOMMERGUES (1960). L'échantillon de sol (100 g) mis dans un bécher et humecté à 75 % de la capacité de rétention maximale en eau, est enfermé dans une enceinte étanche de 1 litre où le CO₂ dégagé est absorbé par une solution de soude N/2 contenue dans une coupelle. L'ensemble est placé à température ambiante d'environ 30 °C. Les mesures du dégagement de CO₂ sont réalisées toutes les 24 heures pendant 21 jours, par un dosage de la soude non carbonatée en présence de thymolphtaléine après précipitation par du chlorure de baryum. Le test est conduit avec 3 répétitions.

1.2. Minéralisation nette de l'azote

La minéralisation nette de l'azote est mesurée, au laboratoire, par le dosage des formes ammoniacale (NH₄⁺) et nitrique (NO₃⁻) de l'azote minéral produit au cours d'une incubation d'un échantillon de sol dans des conditions constantes pendant un temps donné. L'azote minéralisé est obtenu par la différence entre l'azote minéral initial et l'azote minéral au temps t. Plusieurs méthodes, de durée plus ou moins longue, ont été mises au point pour suivre la minéralisation de l'azote en condition aérobie (DROUINEAU et LEFEVRE, 1949 ; BREMNER, 1965 ; STANDFORD *et al.*, 1965) ou anaérobie (WARING et BREMNER, 1964).

La technique utilisée dérive de la méthode de DROUINEAU et LEFEVRE (1949). Dans le test conduit avec 3 répétitions, l'échantillon de sol (30 g) est mis dans un pot en PVC de 49 mm de diamètre et de 10 cm de haut dont la base est fermée par une toile à maille de 50 μm. L'échantillon qui repose sur de la laine de verre placée au fond du pot, est humecté à 75 % de sa capacité maximale de rétention en eau avant de placer l'ensemble à l'étuve à 30 °C. Au cours de l'incubation qui a duré 4 semaines, l'humidité est ajustée par pesées quotidiennes et des pots sont sacrifiés chaque semaine pour le dosage de l'azote minéral.

Les formes ammoniacale et nitrique de l'azote sont dosées par colorimétrie à l'autoanalyseur, après extraction au KCl 1M. Les nitrates sont réduits, par le sulfate d'hydrazine, en nitrites qui sont dosés par réaction colorée avec le sulfanilamide. L'ammonium est dosé par la réaction de Berthelot au bleu d'indophénol.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Minéralisation du carbone

2.1.1. Influence des systèmes de culture

2.1.1.1. Sol de mi-pente

La figure V.1 présente les variations du carbone minéralisé (Cm) sous forme de CO₂ au cours de 21 jours d'incubation. Dans le tableau V.1, sont comparées, les quantités totales moyennes de carbone minéralisé.

Tableau V.1 : Comparaison des quantités de carbone minéralisé et des taux de minéralisation du carbone dans les systèmes de culture du sol de mi-pente

Systèmes de culture	Carbone total (Ct) mg/kg de sol	Carbone minéralisé (Cm) mg/kg de sol	Taux de minéralisation (100 Cm/Ct)
MP1	4200	185,5 ^a	4,4 ^a
MP2	2300	48,3 ^b	2,1 ^b
MP3	2600	84,4 ^c	3,4 ^c
Coef de variation C.V. (%)		7,3	7,2

Les valeurs portant une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de NEWMAN-KEULS.

Le carbone minéralisé varie dans l'ordre suivant : MP1 > MP3 > MP2 et ce, quelle que soit la durée d'incubation (fig.V.1.a). Les écarts sont particulièrement importants entre le sol de jachère (MP1) et les sols cultivés (MP2 et MP3). Au bout de 21 jours, le Cm est de 185,5 mg/kg de sol pour MP1, 84,4 mg/kg de sol pour MP3 et de 48,3 mg/kg de sol pour MP2. Le tableau V.1 montre que ces valeurs présentent une différence significative au seuil de 5 %.

Les taux de minéralisation (fig. V.1.b) suivent des variations similaires : MP1 > MP3 > MP2. Les valeurs en fin d'incubation (4,4, 3,4 et 2,1 % respectivement pour MP1, MP3 et MP2), sont différentes au seuil de 5 % (tableau V.1).

Ces résultats montrent que la culture continue de mil entraîne une baisse du carbone minéralisable du sol. Par rapport au sol sous jachère de 15 ans MP1, le carbone minéralisé en 21 jours baisse de 50 % dans MP2 et 25 % dans pour MP3. Le taux de minéralisation diminue également ; de 4,4 % pour MP1 , il passe à 3,4 % puis à 2,1 % respectivement pour MP3 et MP3. FAUCK *et al.* (1969) et MOREAU (1986) ont aussi observé une baisse du taux de minéralisation avec la durée de la mise en culture. Cette baisse semble être en relation avec la chute des teneurs en carbone organique total, observée dans le sol cultivé.

2.1.1.2. Sol de bas de pente

La figure V.2 présente les variations du carbone minéralisé (Cm) sous forme de CO₂ au cours de l'incubation. Dans le tableau V.2, sont comparées, les quantités totales moyennes de carbone minéralisé.

Le carbone minéralisé (fig V.2.a) varie dans l'ordre suivant : BP3 > BP2 > BP1. Toutefois, pendant les 5 premiers jours d'incubation les courbes sont presque confondues pour BP2 et BP3. Après 21 jours d'incubation (tableau V.2), le Cm est du même ordre de grandeur pour BP2 et BP3 (159,1 contre 179,1 mg/kg de sol) qui se distinguent nettement de la jachère récente BP1 (118,3 mg/kg de sol).

Les taux de minéralisation varient très peu d'une situation à l'autre avec cependant un niveau légèrement plus élevé pour BP2 (4,4 %) que BP1 (4,1 %) et BP3 (4,3 %). Mais les écarts entre les valeurs enregistrées en fin d'incubation ne sont pas significatifs (tableau V.2.b).

Les résultats révèlent que, par rapport au sol sous jachère de 5 ans BP1, la quantité de carbone minéralisé en 21 jours augmente de 31 % dans BP2 et est multipliée par 3 dans BP3. Par contre, le taux de minéralisation n'est que très faiblement affecté (4,1 à 4,4 %). Comme dans le cas du sol de mi-pente, la quantité de carbone minéralisé varie dans le même sens que les teneurs en carbone organique total du sol.

Tableau V.2 : Comparaison des quantités de carbone minéralisé et des taux de minéralisation du carbone dans les systèmes de culture du sol de bas de pente

Systèmes de culture	Carbone total (Ct) en mg/kg de sol	Carbone minéralisé (Cm) en mg/kg de sol	Taux de minéralisation (100 Cm/Ct)
BP1	2900	118,3 ^a	4,1 ^a
BP2	3600	159,1 ^b	4,4 ^a
BP3	4200	179,1 ^b	4,3 ^a
Coef de variation C.V. (%)		7,0	7,8

Les valeurs portant une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de NEWMAN-KEULS.

2.1.1.3. Sol de bas-fond

La figure V.3 présente les variations du carbone minéralisé (Cm) sous forme de CO₂ au cours de l'incubation. Dans le tableau V.3, sont comparées, les quantités totales moyennes de carbone minéralisé.

Tableau V.3 : Comparaison des quantités de carbone minéralisé et des taux de minéralisation du carbone dans les deux systèmes de culture du sol de bas-fond.

Systèmes de culture	Carbone total (Ct) en mg/kg de sol	Carbone minéralisé (Cm) en mg/kg de sol	Taux de minéralisation (100 Cm/Ct)
BF1	14000	405,0 ^a	2,9 ^a
BF2	8300	205,0 ^b	2,5 ^a
Coef de variation C.V. (%)		3,7	3,7

Les valeurs portant une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de NEWMAN-KEULS.

Figure V.1 : Minéralisation du carbone de l'horizon 0-10 cm du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture.

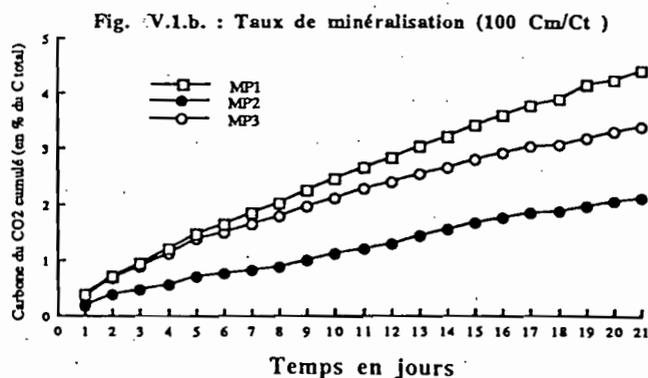
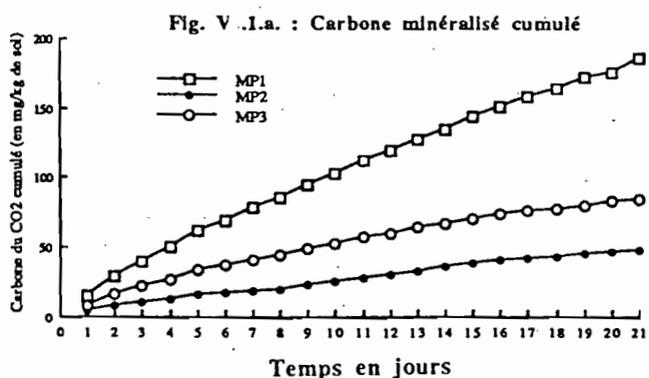


Figure V.2 : Minéralisation du carbone de l'horizon 0-10 cm du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture.

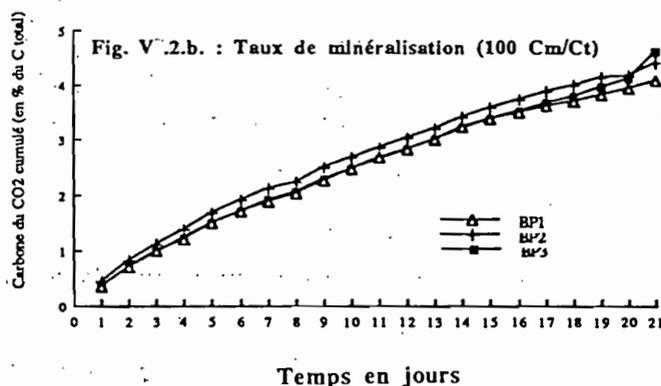
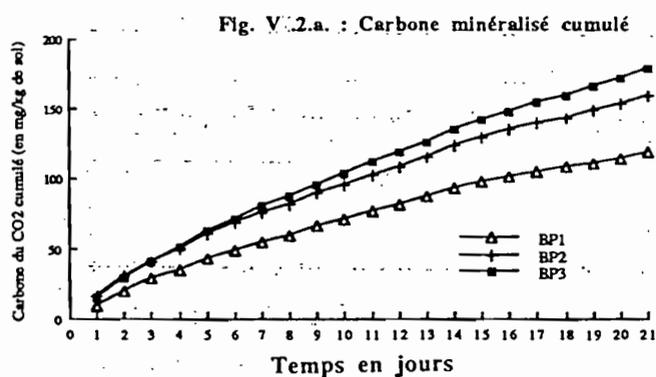
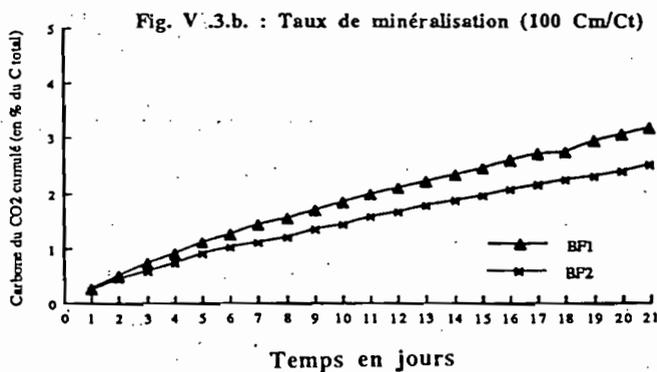
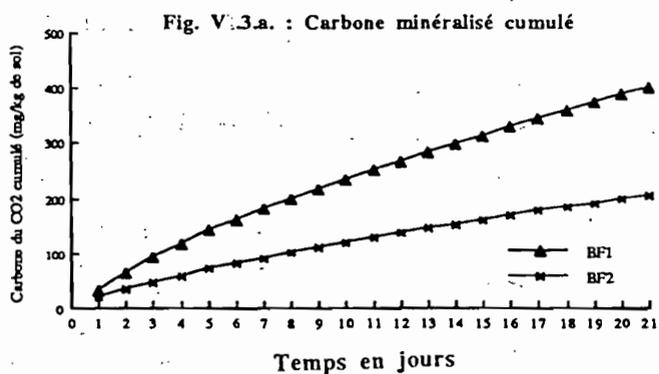


Figure V.3 : Minéralisation du carbone de l'horizon 0-10 cm du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture.



La figure V.3.a montre que le carbone minéralisé du sol sous forêt galerie dégradée (BF1) représente à peu près le double de celui du sol cultivé (BF2). En 21 jours d'incubation, le carbone minéralisé est de 405,3 et 205,2 mg/kg de sol respectivement pour BF1 et BF2.

Les taux de minéralisation (fig.V.3.b) suivent une variation similaire (BF1 > BF2). Les valeurs en fin d'incubation (2,9 et de 2,5 %) ne sont pas significativement différentes (tableau V.3)

Il ressort de ces résultats, une baisse de la minéralisation du carbone dans le sol cultivé BF2 par rapport au sol sous forêt galerie dégradée BF1. La quantité de carbone minéralisé en 21 jours diminue de 50 % alors que la baisse du taux de minéralisation est plus faible.

2.1.2. Facteurs influençant la minéralisation du carbone

La minéralisation du carbone varie en fonction du type de sol. Les valeurs moyennes du carbone minéralisé augmentent du sol de mi-pente (105 mg/kg de sol) au sol de bas-fond (306 mg/kg de sol) en passant par le sol de bas de pente (152 mg/kg de sol). Pour chaque sol, les systèmes de culture modifient de façon significative la quantité de carbone minéralisé.

Les résultats montrent que les différences de minéralisation entre les trois sols d'une part et entre les systèmes de culture sur un même type de sol d'autre part, sont surtout liées à leur teneur en carbone organique total. L'équation de régression entre le carbone organique total (C_t en % de sol) et la quantité de carbone minéralisé (C_m en mg/kg de sol), toutes situations confondues, est de la forme :

$$C_m = 248,4.C_t + 42,4 \quad (R^2 = 0,84)$$

La droite de régression simple est représentée sur la figure V.4. Le coefficient de détermination R^2 (0,84) est significatif au seuil de 1 %. Il indique cependant, qu'une partie du carbone minéralisé n'est pas expliquée par cette relation.

Nous avons utilisé une régression multiple (tableau V.4) faisant intervenir d'autres caractéristiques comme les teneurs en éléments fins (argile + limon) et le pH. Un test (F de FISCHER-SNEDECOR) sur le coefficient de détermination R^2 permet de juger de l'effet de l'introduction d'une variable supplémentaire sur la validité de la régression. Les résultats montrent que la prise en compte de ces caractéristiques n'améliore pas de façon significative les R^2 (0,85 et 0,86).

Le carbone minéralisé est également mis en relation avec le carbone organique total des deux fractions granulométriques 2000-50 et <50 μm respectivement C_{tFG} et C_{tFF} . On observe que la relation est plus forte entre C_m et le contenu en carbone de la

fraction grossière (2000-50 μm) avec un F du coefficient de détermination ($R^2 = 0,85$) significatif au seuil de 1 %. On remarquera même que le R^2 est légèrement supérieur à celui de la régression prenant en compte le carbone organique total du sol. Ceci s'explique par le fait que la matière organique de la fraction grossière est plus labile. Mais l'amélioration du coefficient de détermination en prenant en compte les deux fractions ($R^2 = 0,87$), semble montrer que la fraction fine est également minéralisée. Ces résultats vont dans le même sens que les travaux réalisés en laboratoire (BONDEL, 1971c et MARION *et al.*, 1981) et *in situ* (MARTIN *et al.*, 1990 et BALESSENT *et al.*, 1988).

Ces résultats confirment que les systèmes de culture peuvent modifier certains facteurs affectant la minéralisation du carbone mais qui ne sont pas pris en compte par l'analyse classique de sol (DELPHIN, 1986 et DELPHIN et TIQUET, 1988). Ces auteurs montrent que la technique de piégeage discontinu du CO_2 surestimerait le dégagement en comptabilisant le CO_2 de l'air emprisonné dans l'enceinte avant et après chaque mesure. Ce qui pourrait aussi justifier que 1

5 à 16 % du carbone minéralisé soient inexpliqués par les caractéristiques des sols.

Malgré tout, les teneurs en carbone des sols constituent le principal facteur de minéralisation du carbone. Ce niveau étant affecté par les systèmes de culture, comme cela a été montré au chapitre précédent, on comprend donc que le classement des systèmes de culture en fonction des quantités de carbone minéralisé suive le même ordre que les teneurs en carbone organique total : $\text{MP1} > \text{MP3} > \text{MP2}$ pour le sol de mi-pente ; $\text{BP3} > \text{BP2} > \text{BP1}$ pour le sol de bas de pente ; $\text{BF1} > \text{BF2}$ pour le sol de bas-fond.

Figure V.4 : Relation entre le carbone minéralisé (C_m en mg/kg de sol) et teneurs en carbone organique total (C_t en %) des sols ($n = 8$)

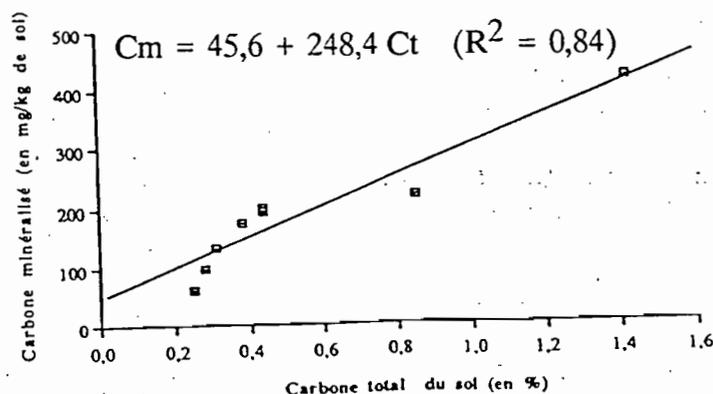


Tableau V.4 : Régression entre minéralisation du carbone et quelques caractéristiques analytiques du sols (n = 8)

Equation de régression	R2	F de R2	Coefficients de régression
$Cm = aCt + c$	0,84	33,2**	a = 248,4 c = 42,4
$Cm = aCt + b(A+L) + c$	0,85	14,4**	a = 311 b = -1,7 c = 54,9
$Cm = aCt + b(A+L) + dpH + c$	0,86	8,1*	a = 333,5 b = -2,4 d = 19,2 c = -57,4
$Cm = aCtFG + c$	0,85	33,8**	a = 51,2 c = 52,8
$Cm = aCtFG + b(A+L) + c$	0,87	16,3**	a = 39,1 b = 1,8 c = 33,5
$Cm = aCtFF + c$	0,67	12,2**	a = 40,6 c = 57,3
$Cm = aCtFG + bCtFF + c$	0,87	17,3**	a = 40,2 b = 12,5 c = 43

* et ** montrent respectivement que le F de R^2 significatif au seuil de 5 et 1 %.

Cm = carbone minéralisé en mg/kg de sol ; Ct = carbone organique total en % ; $A+L$ = teneurs en argile et limon en % ; $CtFG$ et $CtFF$ représentent respectivement le contenu en carbone des fractions 2000-50 et <50 μm en mg/g de sol.

Contrairement aux quantités de carbone minéralisé, les taux de minéralisation sont relativement plus élevés dans les sols de versant. Ils sont en moyenne, de 3,3 % pour le sol de mi-pente, de 4,1 % pour le sol de bas de pente et de 2,7 % pour le sol de bas-fond.

2.2. Minéralisation de l'azote

2.2.1. Influence des systèmes de culture

2.2.1.1. Sol de mi-pente

Les variations des teneurs en azote minéral des échantillons incubés sont représentées dans la figure V.5. L'azote minéralisé, obtenu par différence entre les teneurs dosées au cours de l'incubation et les teneurs initiales, figure dans le tableau V.5

Tableau V.5 : Azote minéralisé, en mg/kg de sol, dans des échantillons du sol de mi-pente (0-10 cm) en fonction des systèmes de culture et du temps d'incubation (n = 3).

Systèmes de culture	Azote minéral initial	Temps en semaines			
		1	2	3	4
MP1	8,0 ± 0,1	8,1 ± 0,3	13,5 ± 0,2	20,3 ± 0,6	21,4 ± 1,2
MP2	5,7 ± 0,5	6,3 ± 0,2	5,1 ± 0,3	8,3 ± 1,4	9,2 ± 0,5
MP3	8,7 ± 0,2	6,3 ± 0,2	7,0 ± 0,8	10,2 ± 1,2	12,8 ± 1,0

Dans les trois situations, la minéralisation nette se caractérise par une très rapide augmentation des teneurs en NO_3^- (fig. V.5.a) et une diminution après une semaine, des teneurs en NH_4^+ (fig. V.5.b). La figure V.5.c montre que les teneurs en azote minéral total augmentent régulièrement dans MP1 alors que dans MP2 et MP3 le maximum semble être atteint dès la première semaine.

La quantité d'azote minéralisé en 4 semaines est de 21,4 mg/kg de sol pour la jachère MP1, de 12,8 et de 9,2 mg/kg de sol respectivement pour le système de culture avec labour et aménagement antiérosif MP3 et le système de culture sans labour et sans aménagement MP2. La comparaison statistique de ces valeurs (tableau V.6) montre que MP1 est significativement supérieur à MP2 et MP3 qui ne sont pas différents. Ce classement des systèmes de culture est le même que celui observé pour les teneurs en azote total.

Les taux de minéralisation (fig. V.5.d) sont, pendant les 3 premières semaines, presque identiques pour MP1 et MP2 et légèrement plus élevés pour MP3. Mais en fin d'incubation, ils sont de 5,6 % pour MP1 et MP3 et de 4,2 % pour MP2. La différence entre ces valeurs n'est pas significative (tableau V.6).

Figure V.5 : Minéralisation nette de l'azote de l'horizon 0-10 cm du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture.

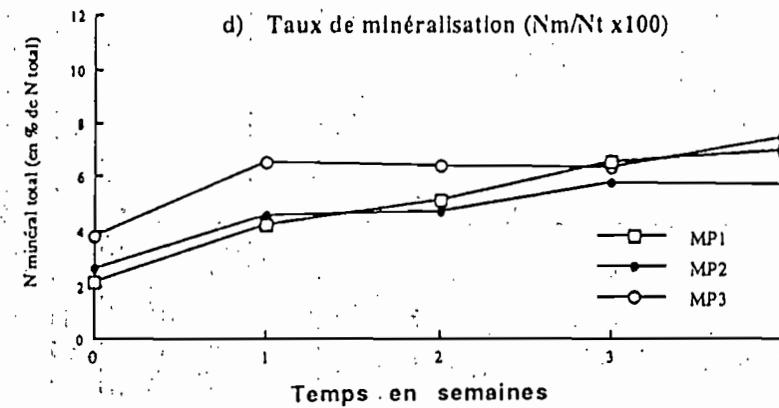
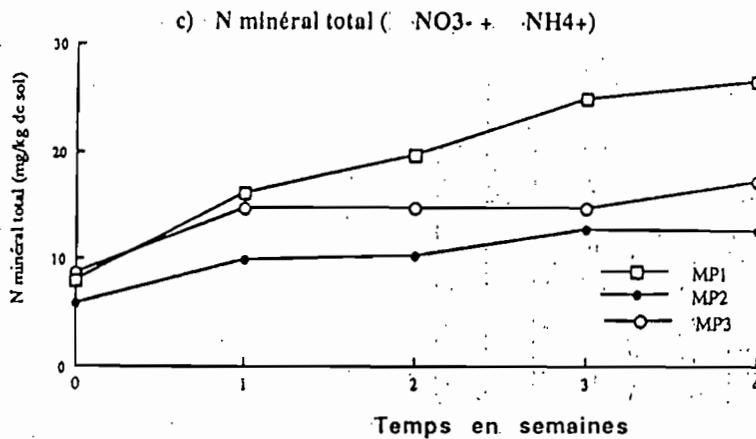
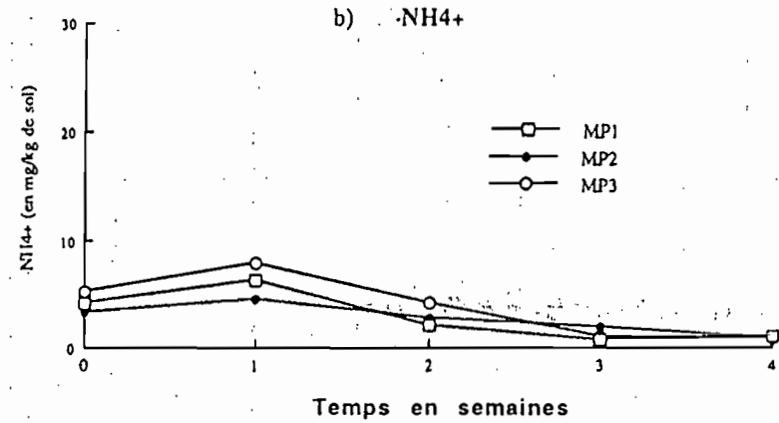
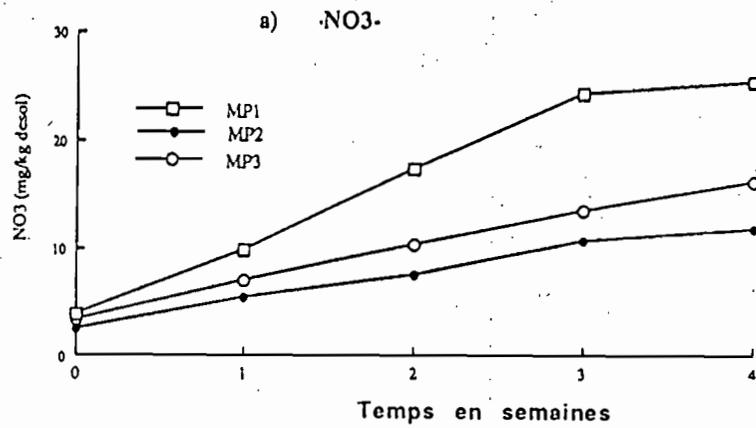


Tableau V.6 : Comparaison des quantités d'azote minéralisé et des taux de minéralisation de l'azote dans les trois systèmes de culture de mi-pente (n = 3)

Systèmes de culture	Azote total (Nt) en mg/kg de sol	Azote minéralisé (Nm) en mg/kg de sol	Taux de minéralisation 100Nm/Nt
MP1	380	21,4 ^a	5,6 ^a
MP2	220	9,2 ^b	4,2 ^a
MP3	230	12,8 ^c	5,6 ^a
Coef de variation C.V. (%)		11,8	9,6

Les valeurs portant une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de NEWMAN-KEULS.

2.2.1.2. Sol de bas de pente

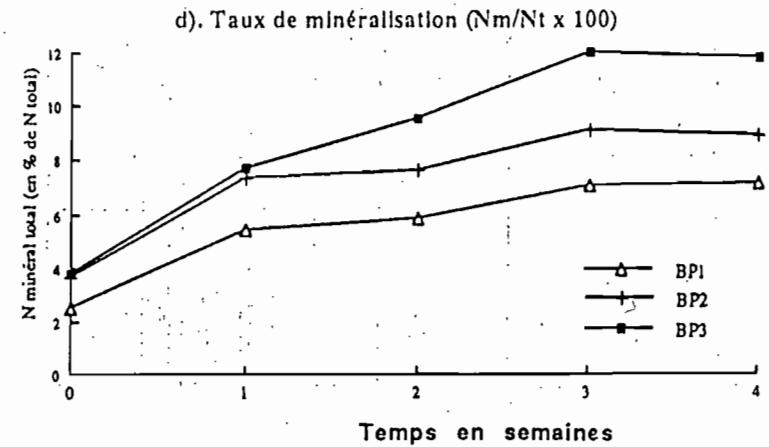
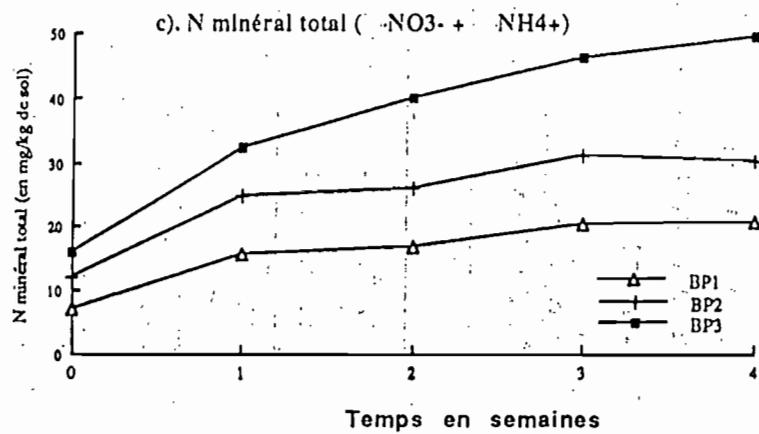
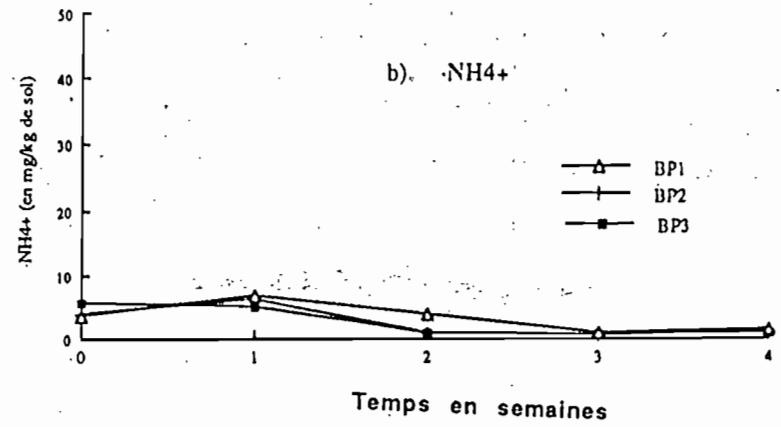
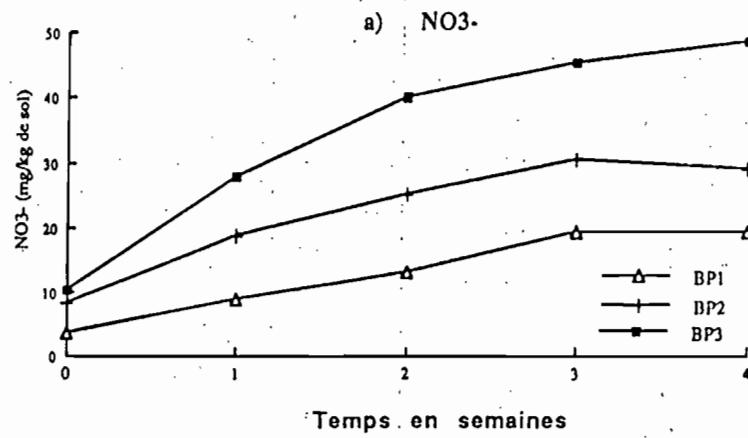
La figure V.6 présente les variations des teneurs en azote minéral des sols incubés, en fonction des systèmes de culture. Les quantités d'azote minéralisé sont regroupées dans le tableau V.7 et comparées dans le tableau V.8.

Comme pour le sol de mi-pente, on observe une rapide augmentation des teneurs en NO_3^- (fig. V.6.a) et une diminution après une semaine de NH_4^+ (fig. V.6.b). Les teneurs en azote minéral total (fig. V.6.c) augmentent régulièrement dans BP3 et restent presque constantes dans BP1 et BP2, après une augmentation la première semaine.

Tableau V.7 : Azote minéralisé, en mg/kg de sol, dans des échantillons du sol de bas de pente (0-10 cm) en fonction des systèmes de culture et du temps d'incubation (n = 3).

Systèmes de culture	Azote minéral initial	Temps en semaines			
		1	2	3	4
BP1	7,2 ± 0,3	8,6 ± 0,6	9,9 ± 2,0	15,9 ± 0,5	15,8 ± 1,6
BP2	12,2 ± 1,1	12,7 ± 2,1	16,8 ± 1,7	22,1 ± 0,1	20,7 ± 2,3
BP3	15,9 ± 1,9	17,6 ± 0,5	28,9 ± 5,1	35,3 ± 2,9	38,1 ± 2,4

Figure V.6 : Minéralisation nette de l'azote de l'horizon 0-10 cm du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture.



L'azote minéralisé, quelle que soit la durée d'incubation, varie dans l'ordre suivant : BP3 > BP2 > BP1. Le tableau V.6 montre que les quantités d'azote minéralisé au bout de 28 jours (15,8 , 20,7 et 38,1 mg/kg de sol respectivement pour BP1, BP2 et BP3), sont significativement différentes.

Les taux de minéralisation (fig. V.6.d) suivent des variations similaires. En fin d'incubation ils sont de 6,1 % pour BP1, 6,9 % pour BP2 et 9,5 % pour BP3. Le tableau V.8 montre que le taux de minéralisation de BP3 est significativement supérieur à ceux de BP2 et BP1.

Tableau V.8 : Comparaison des quantités d'azote minéralisé et des taux de minéralisation de l'azote dans les trois systèmes de culture de bas de pente (n = 3)

Systèmes de culture	Azote total (Nt) en mg/kg de sol	Azote minéralisé (Nm) en mg/kg de sol	Taux de minéralisation 100Nm/Nt
BP1	260	15,8 ^a	6,1 ^a
BP2	300	20,7 ^b	6,9 ^a
BP3	400	38,1 ^c	9,5 ^b
Coef de variation C.V. (%)		9,5	10,4

Les valeurs portant une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de NEWMAN-KEULS.

2.2.1.3. Sol de bas-fond

La figure V.7 présente les variations des teneurs en azote minéral des sols incubés, en fonction des systèmes de culture. Les quantités d'azote minéralisé sont regroupées dans le tableau V.9 et comparées dans le tableau V.10.

La minéralisation nette de l'azote (fig.V.7) présente les mêmes caractéristiques que dans les sols précédents, à savoir, une augmentation rapide des teneurs en NO_3^- (fig. V.7.a) et une chute des teneurs en NH_4^+ (fig. V.7.b) après une semaine d'incubation.

La quantité d'azote minéralisé (tableau V.9) augmente régulièrement dans le sol sous forêt galerie dégradée (BF1) alors que dans l'échantillon de sol cultivé (BF2) l'augmentation est plus faible après la première semaine de minéralisation nette

importante. En fin d'incubation, l'azote minéralisé atteint 52,72 mg/kg de sol pour BF1 contre 23,4 mg/kg de sol pour BF2. Soit une baisse de plus de 50 % pour le sol cultivé.

Les taux de minéralisation (fig. V.7.d) sont identiques dans les deux cas durant la première semaine avant de devenir nettement plus élevés pour le sol sous forêt galerie dégradée. Les valeurs en fin d'incubation sont de 5,1 et 3,4 % respectivement pour BF1 et BF2.

Le classement des teneurs en azote minéral dans les deux systèmes de culture est le même que les teneurs en azote total (BF1 > BF2).

Tableau V.9 : Azote minéralisé, en mg/kg de sol, dans des échantillons du sol de bas-fond (0-10 cm) en fonction des systèmes de culture et du temps d'incubation (n = 3).

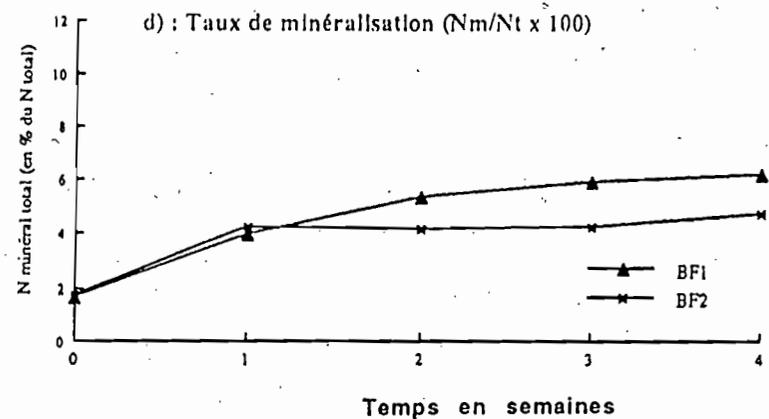
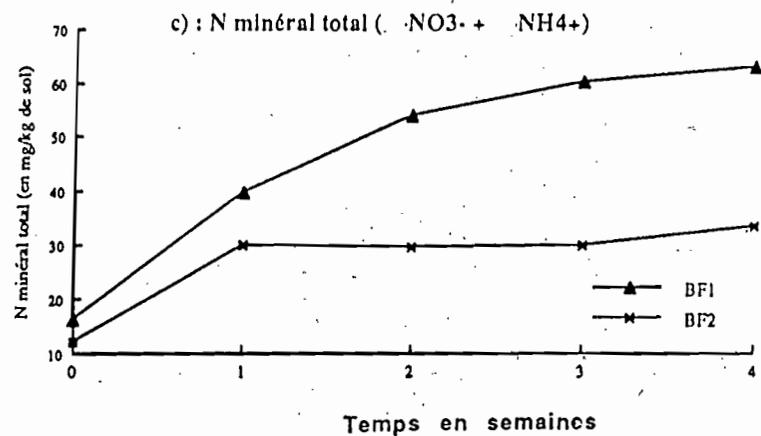
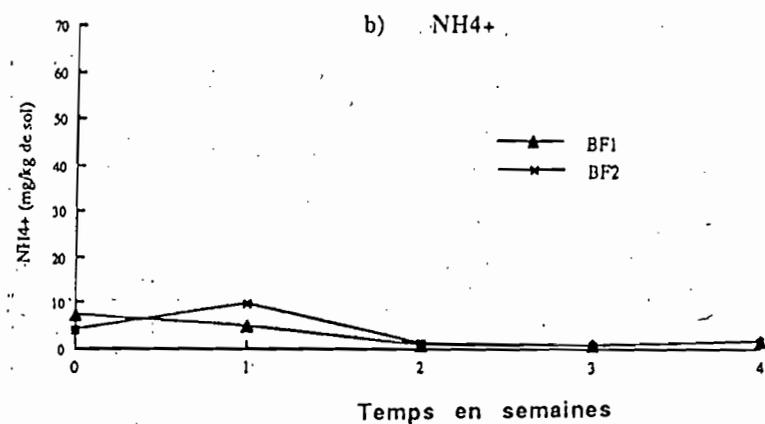
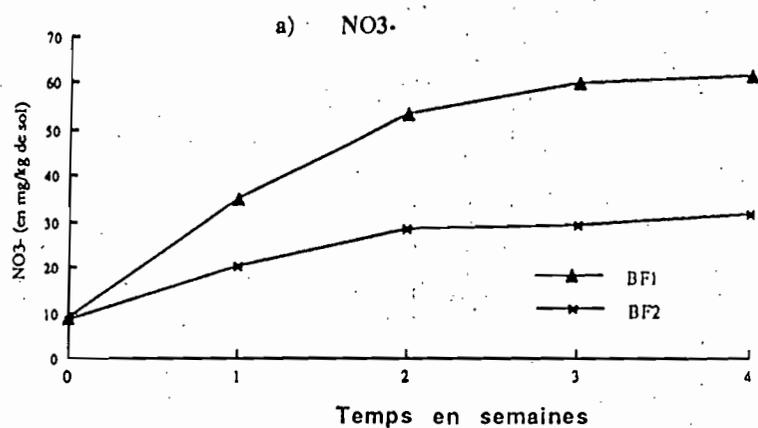
Systèmes de culture	Azote minéral initial	Temps en semaines			
		1	2	3	4
BF1	16,2 ± 0,2	26,0 ± 0,2	44,4 ± 2,5	50,8 ± 0,4	52,72 ± 1,1
BF2	12,2 ± 1,1	17,8 ± 0,2	20,2 ± 3,6	20,8 ± 2,0	23,4 ± 1,9

Tableau V.10 : Comparaison des quantités d'azote minéralisé et des taux de minéralisation de l'azote dans les deux systèmes de culture de bas-fond (n = 3).

Systèmes de culture	Azote total (Nt) en mg/kg de sol	Azote minéralisé (Nm) en mg/kg de sol	Taux de minéralisation 100Nm/Nt
BF1	1019	52,7 ^a	5,2 ^a
BF2	710	23,4 ^b	3,4 ^b
Coef de variation C.V. (%)		4,9	5,7

Les valeurs portant une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de NEWMAN-KEULS.

Figure V.7 : Minéralisation nette de l'azote de l'horizon 0-10 cm du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture.



2.2.2. Facteurs influençant la minéralisation de l'azote

La minéralisation nette de l'azote varie en fonction du type de sol. Les valeurs moyennes d'azote minéralisé augmentent du sol de mi-pente (14,5 mg/kg de sol) au sol de bas-fond (38,1 mg/kg de sol) en passant par le sol de bas de pente (24,9 mg/kg de sol). Pour chaque sol, les systèmes de culture modifient de façon significative la quantité d'azote minéralisé.

Comme dans le cas du carbone, il existe des relations étroites entre les quantités d'azote minéralisé et certaines caractéristiques analytiques des sols. Ce qui expliquerait les différences de minéralisation entre les trois sols d'une part et entre les systèmes de culture sur un même type de sol d'autre part. Dans le tableau V.11 sont présentées les régressions entre l'azote minéralisé (Nm), l'azote total (Nt), l'azote minéral initial (Nm0), les teneurs en éléments minéraux fins (A+L) et le pH.

La régression entre l'azote minéralisé et l'azote total est significative au seuil de 5 % avec un coefficient de détermination R^2 de 0,69. La droite de régression, représentée dans la figure V.8, est de la forme :

$$Nm = 42,3 Nt + 5,7$$

La relative faiblesse du R^2 peut être expliquée par les pertes d'une partie de l'azote minéralisé qui, dans nos conditions d'expérience, sont essentiellement dues à la réorganisation. L'importance de la réorganisation est fonction du rapport C/N et du carbone organique total. Plus le C/N est élevé, plus les besoins azotés microbiens sont grands. Dans tous les cas, dans une telle expérience d'incubation, il se produit un accroissement de l'activité minéralisatrice (durant les 1 à 2 premières semaines) qui entraîne une augmentation non seulement de la minéralisation de l'azote mais aussi des besoins azotés.

L'hypothèse de la réorganisation est confortée car lorsqu'on introduit l'azote minéral initial dans la régression, la corrélation est nettement améliorée avec un R^2 de 0,88 significatif à 1 %. Cela signifie que l'azote minéral initial joue un rôle important dans la minéralisation nette de l'azote. Ce rôle a été observé par plusieurs auteurs (GIROUX et SEN TRAN, 1987).

Figure V.8 : Relation entre l'azote minéralisé (N_m en mg/kg de sol) et les teneurs en azote total (N_t en ‰ de sol) des sols ($n = 8$)

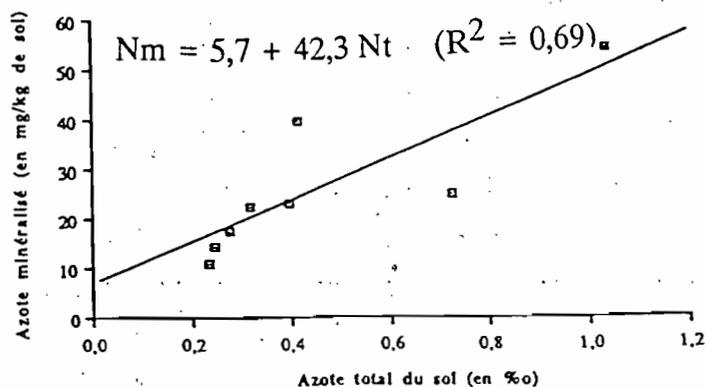


Tableau V.11 : Régression entre minéralisation de l'azote et quelques caractéristiques analytiques du sol ($n = 8$).

Equation de régression	R ²	F de R ²	Coefficients de régression
$N_m = aN_t + c$	0,69	13,2*	$a = 42,3 \quad c = 5,7$
$N_m = aN_t + b(A+L) + c$	0,69	5,5	$a = 35,7$ $b = 0,1 \quad c = 5,2$
$N_m = aN_t + bN_{mo} + c$	0,88	18,3**	$a = 20,4$ $b = 2,2 \quad c = -8,6$
$N_m = aN_t + bN_{mo} + dpH + c$	0,92	15,6*	$a = 31,8$ $b = 0,8$ $d = 10,7 \quad c = -64$
$N_m = aN_tFG + c$	0,55	7,5*	$a = 250,4 \quad c = -0,5$
$N_m = aN_tFF + c$	0,61	9,3*	$a = 42,9 \quad c = 9,6$

* et ** montrent respectivement que le F de R^2 significatif au seuil de 5 et 1 %.

N_m = azote minéralisé en mg/kg de sol ; N_{mo} = azote minéral initial ; N_t = azote total en ‰ ; $A+L$ = teneurs en argile et limon en ‰ ; N_tFG et N_tFF représentent respectivement le contenu en azote des fractions 2000-50 et <50 μm en mg/g de sol

La prise en compte du pH comme troisième variable permet une augmentation significative (seuil de 5 %) du R^2 (0,92). La relation avec le pH traduit l'effet de l'ambiance physico-chimique qui peut être plus ou moins favorable à l'activité microbienne en fonction la richesse en bases.

Par contre, la relation entre la minéralisation nette, l'azote total et les teneurs en éléments minéraux fins (argile + limon), n'est pas améliorée ($R^2 = 0,69$) par rapport à la prise en compte de N total uniquement. Le F de la régression n'est pas significatif.

Les résultats montrent que le pouvoir minéralisateur, apprécié par la minéralisation nette de l'azote, est expliqué à la fois par l'azote total, l'azote minéral initial et le pH. Toutes ces caractéristiques sont modifiées dans le même sens pour un système de culture donné (chapitre III). Il est donc normal que le classement des systèmes de culture en fonction de la minéralisation de l'azote soit similaire à celui portant sur ces caractéristiques à savoir, $MP1 > MP3 > MP2$ pour le sol de mi-pente, $BP3 > BP2 > BP1$ pour le sol de bas de pente et $BF1 > BF2$ pour le bas-fond.

3. CONCLUSION

L'influence des systèmes de culture sur le pouvoir minéralisateur des sols a été appréciée par la minéralisation du carbone et de l'azote.

Les résultats montrent que le carbone minéralisé en 21 jours varie en fonction des types de sols et, pour chaque sol, des systèmes de culture. L'ordre de classement du carbone minéralisé en fonction du type de sol est le suivant : sol de bas-fond > sol de bas de pente > sol de mi-pente avec quantités moyennes respectives de 306, 152 et 105 mg/kg de sol. Pour chaque sol, les systèmes de culture modifient la minéralisation du carbone de la façon suivante :

- en mi-pente, le carbone minéralisé diminue dans le sol cultivé (74 % dans MP2 contre 55 % dans MP3) par rapport au sol sous jachère MP1 ; le taux de minéralisation baisse également, de 4,4 % dans MP1, il passe à 3,4 et 2,1 % respectivement dans MP3 et MP2 ;

- en bas de pente, par rapport au sol sous jachère de 5 ans BP1, la quantité de carbone minéralisé augmente dans le sol cultivé avec fumure de 35 % pour BP2 et de 52 % pour BP3 ; le taux de minéralisation est comparable dans les trois cas (4,1 à 4,4 %) ;

- dans le bas-fond, la culture continue de sorgho BF2 entraîne, par rapport au sol sous forêt galerie BF1, une baisse du carbone minéralisé de 50 % alors que le taux de minéralisation reste comparable 2,9 et 2,5 %.

L'analyse de ces résultats indique que les quantités de carbone minéralisé augmentent avec les teneurs en carbone organique total des sols ; le coefficient de corrélation r est de l'ordre de 0,93 au seuil de 1 %.

Concernant l'azote, la variation des quantités d'azote minéralisé en fonction des sols et des systèmes de culture est similaire à celle du carbone. Les quantités moyennes d'azote minéralisé diminuent du sol de bas-fond (38,1 mg/kg de sol) au sol de mi-pente (14,5 mg/kg de sol) ; le sol de bas de pente a une valeur intermédiaire (25,9 mg/kg de sol). Pour chaque sol, les systèmes de culture affectent la minéralisation nette de l'azote de la manière suivante :

- en mi-pente, les quantités d'azote minéralisé diminuent dans le sol cultivé (55 % pour MP2 et 40 % pour MP3) par rapport au sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1 ; le taux de minéralisation diminue, de façon non significative, de 5,6 % dans MP1 et MP3 à 4,2 % dans MP2 ;

- pour le sol de bas de pente, par rapport au sol sous jachère arbustive de 5 ans BP1, les quantités d'azote minéralisé augmentent de 31 % dans BP2 et triplent presque dans BP3 ; le taux de minéralisation augmente significativement dans le même sens de 6,1 dans BP1 à 9,6 % dans BP3 ;

- dans le bas-fond, la minéralisation nette de l'azote baisse de 50 % dans le sol cultivé BF2 par rapport au sol sous forêt galerie dégradée BF1 ; le taux de minéralisation diminue nettement de BF1 (5,2 %) à BF2 (3,4 %).

La minéralisation de l'azote, est liée à la fois aux teneurs en azote total ($r = 0,83$ au seuil de 5 %) et à d'autres caractéristiques comme le pH et l'azote minéral initial ($r = 0,96$ au seuil de 1 %). Comme pour le carbone, ces caractéristiques sont modifiées par les systèmes de culture (chapitre III).

De l'ensemble de ces résultats il ressort que les systèmes de culture modifient les teneurs en carbone et azote minéralisables des sols. Cela pourrait affecter l'activité biologique des sols au champ avec des conséquences sur la disponibilité des éléments minéraux, de l'azote minéral en particulier. Cette question sera étudiée dans la troisième partie.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Dans cette partie nous avons étudié, pour chacun des trois sols concernés, l'influence des systèmes de culture sur les modifications des caractères morphologiques, chimiques et biologiques.

Sur le plan morphologique, les facteurs climatiques (pluie et vent) tendent à imprimer à la structure de la couche supérieure du sol un caractère massif plus ou moins lité. Cette tendance est liée aux phénomènes de prise en masse, de tassement et d'érosion. Les sols ferrugineux de versant, plus sableux, sont plus sensibles que le sol de bas-fond plus argileux. Les systèmes de culture interviennent surtout sur l'ampleur de cette action qui semble augmenter avec la pratique du labour.

Les résultats montrent une diminution des quantités de débris organiques dans la couche de surface des sols cultivés sans restitution organiques (MP2 et MP3 pour le sol de mi-pente et BF2 pour celui de bas-fond) par rapport au sol sous jachère de 15 ans (MP1) ou sous forêt galerie dégradée (BF1). Mais dans les systèmes de culture avec fumure organique (BP2 et BP3), la couche travaillée s'enrichit en débris organiques par rapport au sol sous jachère herbacée de 5 ans.

Dans tous les sols, l'abondance de débris organiques entraîne un accroissement d'une activité faunique (termites essentiellement) qui se traduit par une augmentation de la porosité tubulaire. Cette activité faunique semble dépendre aussi de la nature de la matière organique ; elle est particulièrement développée dans le sol recevant d'importants apports de fumier.

Concernant les caractères chimiques, les effets des systèmes de culture sont plus marqués. Les modifications concernent l'horizon A et surtout la couche 0-10 cm.

En mi-pente, les résultats révèlent une baisse des teneurs en carbone organique total, en azote total, en bases échangeables et du pH dans le sol sous culture (MP2 et MP3) par rapport au sol sous jachère arbustive de 15 ans MP1. Cette baisse concerne surtout la couche 0-10 cm et est plus importante pour les teneurs en carbone organique et azote totaux (40 à 50 %) que les bases échangeables (33 %) et le pH (0,2 unité). Mais l'application de la fumure minérale (25 kg/ha de NPK 15-20-15) semble au moins contribuer à maintenir les teneurs en P₂O₅ assimilable par rapport à la jachère même si la différence n'est pas significative. La différence entre la culture continue sans labour ni aménagement MP2 et la culture continue avec labour et aménagement antiérosif MP3, concerne surtout les teneurs en carbone : celles-ci sont sensiblement plus élevées dans MP3. Bien que statistiquement non significative, cette différence existe aux niveaux de profondeur étudiés ; elle pourrait résulter de l'accroissement de la biomasse racinaire lié à l'aménagement antiérosif associé au labour.

En bas de pente, une culture continue avec une faible fumure organique sans labour BP2 et une culture continue avec labour et une forte fumure organique (par parage de bétail) BP3, sont comparées avec une jachère de 5 ans BP1. Sous culture, les teneurs en carbone organique total, azote total, bases échangeables et phosphore total et le pH du sol augmentent par rapport à la jachère. Cette augmentation est proportionnelle au niveau des restitutions organiques. Les modifications concernent uniquement la couche 0-10 cm pour le carbone et l'azote total avec des teneurs augmentant de 25 % dans BP2 et d'environ 50 % dans BP3. Pour les autres caractéristiques, les modifications touchent tout l'horizon A (0-35 cm) mais restent plus marquées dans la couche 0-10 cm : la somme des bases échangeables augmente de 7 % dans BP2 et est multipliée par 2 dans BP3, l'accroissement du pH est de 0,2 unité dans BP2 et atteint 1,1 à 1,7 unité dans BP3. Ces résultats confirment l'effet favorable de fumure organique sur les caractéristiques chimiques. La technique de parage qui permet de concentrer les apports (déjections solides et liquides des animaux et résidus végétaux déchiquetés) sur des portions de parcelle, se révèle efficace en particulier sur le pH.

Dans le bas-fond, la culture continue de sorgho BF2 entraîne une baisse des teneurs en carbone organique total, azote total, bases échangeables et phosphore total et légèrement du pH par rapport au sol sous forêt galerie dégradée BF1. Cette chute concerne l'horizon A (0-35 cm). Dans les 10 premiers centimètres, elle représente 50 % pour les teneurs en carbone organique et azote totaux, 56 % pour la somme des bases, 22 % pour le phosphore total et le phosphore assimilable et 0,3 unité pour le pH. La culture continue sans restitution organique dans le bas-fond entraîne donc une chute des statuts organique et minéral du sol.

Le fractionnement granulométrique a permis de séparer la matière organique de la couche 0-10 cm en deux fractions : la matière organique associée à la fraction grossière (2000-50 μm) ayant un rapport C/N relativement élevé (14 à 38) et la matière organique liée à la fraction fine (< 50 μm) dont le rapport C/N est relativement bas (6,3 à 12). Les systèmes de culture modifient les teneurs et contenus en carbone organique et azote totaux des fractions dans le même sens que les teneurs des sols. Les résultats montrent en effet, une baisse des teneurs et contenus des fractions dans les sols cultivés sans fumure organique (MP2, MP3 en mi-pente et BF2 dans le bas-fond) par rapport aux sols sous jachère arbustive (MP1 en mi-pente) et sous forêt galerie dégradée (BF1 dans le bas-fond). Inversement, la fumure organique entraîne, proportionnellement à l'importance des apports, une augmentation des teneurs et contenus des fractions. Ces modifications quantitatives s'expliqueraient par les différences de restitutions organiques.

Les modifications quantitatives entraînent des différences dans la répartition du carbone et de l'azote dans les fractions granulométriques. Pour le carbone organique total, les contenus de la fraction grossière sont les plus modifiés car 77 à 93 % des différences entre les systèmes de culture sont dûs à cette fraction ; les contenus de la fraction fine varie relativement peu. Cela s'explique par le fait que le carbone organique total de la fraction grossière, plus labile, a un taux de renouvellement plus élevé que celui de la fraction fine plus stable. Concernant l'azote total, les modifications peuvent être importantes pour les deux fractions : la part de la fraction grossière dans les variations des contenus varie entre 29 et 75 % alors que celle de la fraction fine va de 25 à 71 %. Les processus de minéralisation-réorganisation entraînant un transfert d'azote entre les deux fractions expliqueraient ces résultats.

Le pouvoir minéralisateur des sols, apprécié par la minéralisation du carbone et la minéralisation nette de l'azote, est également affecté par les systèmes de culture. Les modifications vont dans le même sens que la variation des teneurs en carbone organique total et azote total des sols. Les quantités de carbone et d'azote minéralisés sont étroitement liées au niveau organique des sols ($r = 0,93$ pour le carbone et $r = 0,83$ pour l'azote au seuil de 5 %). Ces résultats révèlent une modification des quantités de carbone et d'azote minéralisables et de l'activité biologique des sols, qui pourrait affecter, au cours de la saison des pluies, l'évolution de l'azote minéral au champ.

L'ensemble de ces résultats confirme la baisse des niveaux organique et minéral des sols avec la mise en culture continue. Toutefois, la baisse dépend des systèmes de culture en particulier de leur régime de restitutions organiques et peut être de leur effet antiérosif. Mais malgré les différences entre les systèmes de culture, les résultats révèlent aussi, qu'à l'exception du sol de bas-fond sous forêt galerie dégradée BF1, les niveaux organique et minéral des sols sont faibles à très faibles. Il apparaît donc opportun de rechercher les possibilités d'améliorations de ces sols par les restitutions organiques.

La suite du travail sera consacrée à l'étude de l'influence des modifications des caractères des sols sur l'évolution de l'azote minéral au champ (troisième partie) et à l'étude de la dynamique de la matière organique en fonction des conditions pédoclimatiques (quatrième partie).

Troisième partie

**ETUDE DE LA VARIATION SAISONNIERE DE
L'AZOTE MINERAL DES SOLS AU COURS DE LA
SAISON DE CULTURE.**

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE

Les quantités d'éléments nutritifs présents dans le sol au cours du cycle cultural, déterminent la qualité de la nutrition minérale des plantes et, en grande partie, les rendements quantitatifs des cultures. Parmi les éléments nutritifs essentiels, l'azote est celui qui fournit la réponse la plus marquée (PICHOT *et al.*, 1981). Dans la zone concernée où la fumure minérale est quasi inexistante, les besoins azotés des cultures devraient être assurés par les réserves du sol qui sont essentiellement sous forme organique. Il devient donc opportun de connaître l'influence des systèmes de culture sur le potentiel de fourniture de l'azote minéral du sol. Dans le chapitre V, le test de minéralisation de l'azote au laboratoire a révélé un effet significatif des systèmes de culture sur les teneurs en azote minéral des sols. Mais au champ, les conditions pédoclimatiques et les opérations culturales peuvent aussi affecter l'évolution de l'azote minéral du sol au cours de la saison des pluies.

L'objectif de cette partie est de préciser, au cours de la saison de culture, les effets des facteurs et conditions agropédoclimatiques sur les variations des teneurs en azote minéral des sols des 8 parcelles concernées. Cette connaissance de l'évolution de l'offre en azote minéral au cours de la saison de culture, est également nécessaire pour définir les conditions d'une utilisation efficace de la fumure minérale (CATROUX *et al.*, 1987).

L'étude des variations annuelles *in situ* de l'azote minéral en zone tropicale à saisons contrastées (GREENLAND, 1958 ; PICHOT *et al.*, 1974 ; SANCHEZ, 1976 et GIGOU, 1983) montrent une nette différence entre la saison sèche et la saison des pluies. Celle-ci s'explique par le rôle important de l'humidité du sol dans les processus de minéralisation de la matière organique. D'autres travaux portant sur la dynamique de l'azote au cours de la saison des pluies (BLONDEL, 1971a ; PICHOT *et al.*, 1974 ; GIGOU, 1983 et POSS, 1991) mettent en évidence l'influence déterminante de la quantité et de la répartition des pluies sur la disponibilité de l'azote minéral dans le sol. En fait, l'humidité du sol intervient à plusieurs niveaux dans la dynamique de l'azote minéral. Elle peut, en effet, être plus ou moins favorable à l'activité biologique (minéralisation de l'azote), à l'absorption d'azote minéral par les plantes, aux pertes d'azote minéral par lixiviation et à d'autres processus de pertes d'azote minéral, notamment à la dénitrification. L'humidité du sol apparaît donc comme un paramètre devant être bien caractérisé pour mieux comprendre la dynamique saisonnière de l'azote *in situ*.

La présente partie comprend trois chapitres. Dans le chapitre VI seront présentés les matériels et méthodes de suivi au champ. Les conditions hydriques des sols au cours des deux saisons culturales (1989 et 1990) seront étudiées dans le chapitre VII. Le chapitre VIII sera consacré à l'évolution de l'azote minéral pendant la période considérée.

CHAPITRE VI

MATERIEL ET METHODES

1. DISPOSITIF DE SUIVI AU CHAMP

Le suivi porte sur chacune des 8 situations étudiées, notamment sur les parcelles de prélèvements de 225 m² décrites au chapitre III. Ces dernières n'ont pas connu de traitement particulier en dehors des opérations culturales réalisées dans chaque système de culture. Le travail a consisté en des prélèvements d'échantillons composites sur trois profondeurs (0-10 cm, 10-20 cm et 20-40 cm) à des pas de temps variables au cours de la saison de culture, en vue de doser l'azote minéral.

Les échantillons composites sont constitués, pour les trois profondeurs, à partir de 25 échantillons élémentaires prélevés à l'aide d'un tube de prélèvement de 49 mm de diamètre dans les 25 sous-parcelles de 3 x 3 m chacune. La variabilité de l'échantillonnage est étudiée à partir de 4 répétitions de l'échantillon composite.

Le suivi a été réalisé au cours des saisons de culture de 1989 et 1990. Le rythme des prélèvements est le suivant : en 1989 les prélèvements ont été effectués une fois en début juin (début de saison) puis systématiquement tous les 10 jours du 15 juillet au 30 septembre (fin de la saison des pluies) ; en 1990, deux prélèvements ont été faits en juin (début et fin), puis toutes les semaines pendant le mois de juillet et enfin tous les 10 jours pendant août et septembre. La saison pluvieuse de 1990 ayant démarré effectivement en juillet, les prélèvements ont été relativement plus serrés pendant ce mois pour tenir compte du rôle important qu'ont les premières grosses pluies dans la dynamique de la matière organique (BONDEL, 1971a ; GREENLAND, 1958 et GIGOU, 1983). Nous avons malheureusement, pour des raisons d'ordre pratique, manqué cette période en 1989. Au total 7 prélèvements ont été faits en 1989 contre 10 en 1990.

2. DETERMINATIONS ANALYTIQUES

2.1. Caractérisation des conditions hydriques

La pluviométrie des deux saisons de suivi, représentée sur la figure VI.1, illustre bien la mauvaise répartition des pluies d'une année à l'autre. En 1989, année pluvieuse, on a enregistré 550 mm de pluies en 44 jours contre 350 mm pour 33 jours en 1990. Mais les caractéristiques communes des deux saisons sont la mauvaise répartition des pluies dans de temps et le nombre élevé de pluies inférieures à 10 mm. Cela se traduit au niveau de l'humidité du sol, par une succession de périodes humides et de périodes sèches dont l'importance est fonction de la situation topographique et du système de culture.

Un suivi de l'humidité pondérale des sols a été effectué au cours de la période concernée. L'humidité a été déterminée à chaque date de prélèvement sur les échantillons composites sur lesquels l'azote minéral été également dosé. Mais en 1990 le suivi de l'humidité a été plus serré (tous les 4 à 5 jours) en effectuant une détermination entre deux prélèvements.

2.2. Dosage de l'azote minéral.

Les formes d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) présentes dans le sol, évoluent très vite dans un échantillon prélevé (BONDEL, 1971a ; GIGOU, 1983 ; VIAUX, 1983). Aussi est-il nécessaire de les doser immédiatement après le prélèvement si l'on veut connaître les teneurs du sol à ce moment. Toutefois, il est possible, dans des conditions particulières de conservation, de différer le dosage. VIAUX (1983) montre que l'un des moyens qui permettent une conservation d'une à deux semaines, avec le moins de risque d'évolution des formes de l'azote minéral, est d'extraire l'azote minéral et de conserver les extraits au frais et à l'abri de la lumière.

Du fait de l'éloignement de notre lieu d'étude (200 km environ) et du laboratoire d'analyses, c'est cette solution que nous avons adoptée pour le suivi *in situ*. Ainsi les extractions sont faites au KCl 1M immédiatement après chaque prélèvement et les extraits sont placés dans une glacière très étanche contenant des barres de glace en nombre suffisant pour maintenir une température de 10 °C environ jusqu'au dosage. En outre, les extraits sont stabilisés au moment de l'extraction, par du toluène (1ml /100 ml d'extrait).

Les formes ammoniacale (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-) ont été dosées par colorimétrie au spectrophotomètre au laboratoire d'analyses de sols du Bureau National des Sols (BUNASOLS, 1987), à Ouagadougou. 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 qui sont dosés par réaction colorée.

2.3. Variabilité de l'échantillonnage

La variabilité des teneurs en azote minéral est estimée avec 4 répétitions de l'échantillonnage composite prélevé le 30/07/90 dans le sol cultivé sans labour ni aménagement antiérosif en mi-pente (MP2). Les résultats, rassemblés dans le tableau VII.1, montrent que la répartition de l'azote minéral est très hétérogène. Les coefficients de variation vont de 29,1 à 38,9 % pour l'azote NO_3^- . La variation est similaire pour l'azote NH_4^+ dans la couche 0-10 cm. En profondeur, en raison des faibles teneurs, les coefficients de variation sont très élevés.

Ces résultats sont comparables à ceux de GIGOU (1983) qui trouve des coefficients de variation de l'ordre de 30 % dans un échantillonnage simple. MOREL (1988) rapporte également des variations similaires en milieu tempéré. Cette hétérogénéité s'explique par le fait que les différents facteurs et conditions qui agissent sur la disponibilité de l'azote minéral du sol (activité biologique, absorption par les plantes, lixiviation, réorganisation, etc...) sont très variables dans une même parcelle.

2.4. Limites de la méthode

Outre l'hétérogénéité spatiale, les différents facteurs et conditions agissant sur la disponibilité de l'azote minéral dans le sol varient dans le temps : l'exemple des variations pluviométriques intra-annuelles et inter-annuelles en est une parfaite illustration (cf. chapitres I et VI). De ce fait, pour des paramètres à dynamique rapide comme l'azote minéral, une étude de courte durée (2 ans), même si elle permet de bien comprendre les variations pendant la période considérée, a une portée assez limitée.

Tableau VI.1 : Variabilité des teneurs en azote minéral (en mg/kg de sol) de l'échantillon composite dans le sol cultivé sans labour en mi-pente (MP2)

Date de prélèvement	Azote minéral	Profondeur (en cm)	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	Ecart type	Coefficient de variation (en %)
30/07/90 (n = 4)	N-NO ₃ ⁻	0-10	2,58	2,04	3,64	0,75	29,1
		10-20	2,46	2,05	3,67	0,70	28,5
		20-40	3,21	1,99	4,80	1,25	38,9
	N-NH ₄ ⁺	0-10	1,38	0,81	1,86	0,38	27,5
		10-20	-	trace	0,10	-	-
		20-40	-	trace	0,38	-	-

CHAPITRE VII

CONDITIONS HYDRIQUES DES SOLS AU COURS DES SAISONS DE CULTURE DE 1990 ET 1989

L'humidité et la température des sols sont les conditions pédoclimatiques qui jouent un rôle déterminant dans les processus d'évolution de la matière organique et de l'azote en particulier.

Plusieurs auteurs (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; BERNHARD-REVERSAT, 1977 ; MOUREAUX, 1968 et GIGOU 1983) montrent que dans la zone concernée, la température est toujours favorable à l'activité biologique (25 à 35 °C). L'humidité du sol, par contre, est variable en fonction de la quantité et de la répartition des pluies au cours de la saison.

L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier, au cours de la saison des pluies, la variation de l'humidité du sol dans les 8 parcelles étudiées.

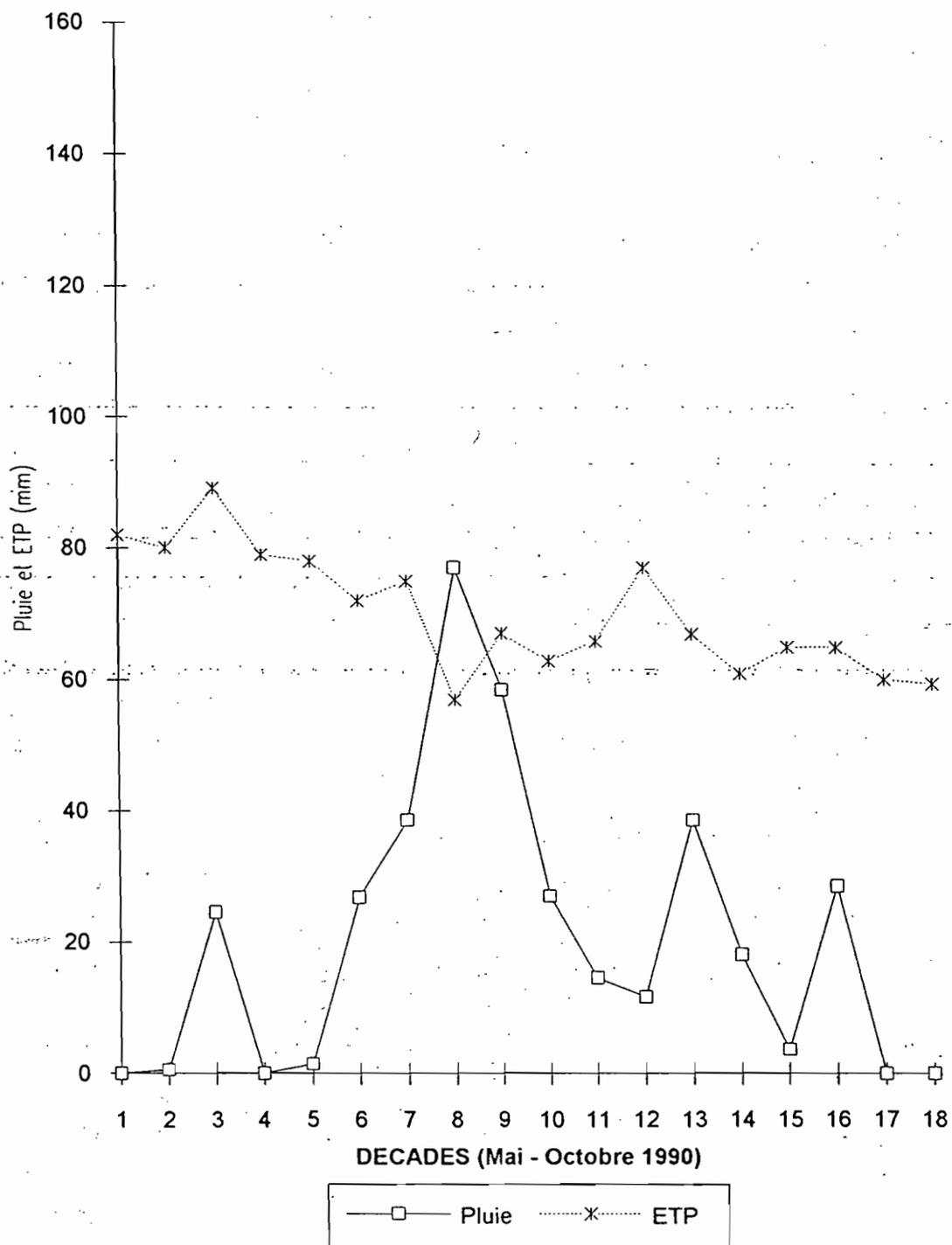
On remarquera (chapitre VI) que le suivi de 1989 n'a pas couvert toute la saison des pluies à cause de problèmes d'ordre pratique qui n'ont pas permis la mise en place du dispositif de prélèvement avant l'arrivée des premières pluies. Pour cette raison nous présenterons d'abord les données de 1990 qui sont plus complètes puis celles de 1989 à titre comparatif.

1. SAISON PLUVIEUSE DE 1990

Durant la saison des pluies de 1990, il a plu 372,9 mm. Ce qui est très en deçà de la moyenne. La première grosse pluie (24,5 mm) est tombée le 28 mai. Mais il fallait attendre fin juin pour l'installation effective de la saison. Seule la 2^{ème} décade de juillet a enregistré une pluviométrie légèrement supérieure à l'évapotranspiration (figure VII.1).

Le suivi de l'humidité du sol a commencé le 9 juin (12 jours après la pluie du 28 mai) jusqu'au 25 septembre.

Figure VII.1 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle décadaires à Bidi de mai à octobre 1990



1.1. Sol de mi-pente

Les résultats sont représentés sur la figure VII.2.

Les taux d'humidité, toutes profondeurs confondues, varient de 0,65 à 14,8 % pour le sol de jachère MP1, de 0,4 à 11,8 % pour le sol cultivé sans labour ni aménagement MP2 et de 0,4 à 12,3 % pour le sol cultivé avec labour et aménagement antiérosif MP3.

Pour les trois parcelles, la comparaison des résultats avec l'humidité au pF 4,2 (3,6 %) montre quatre périodes dans l'évolution de l'humidité du sol.

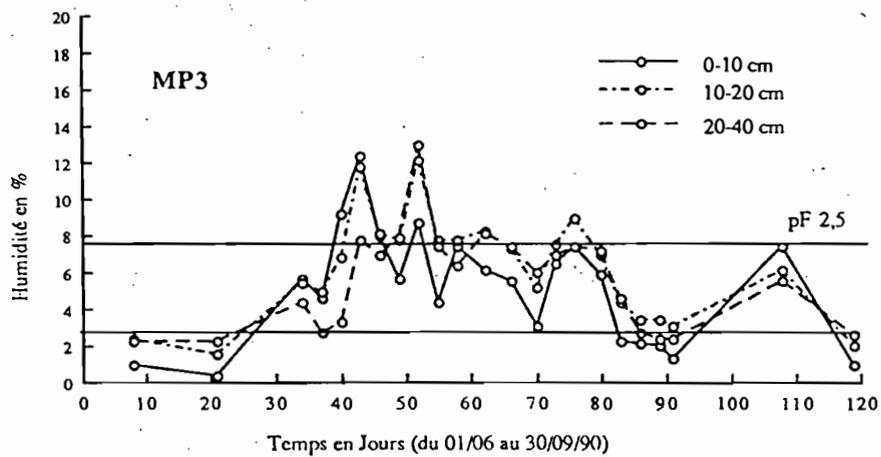
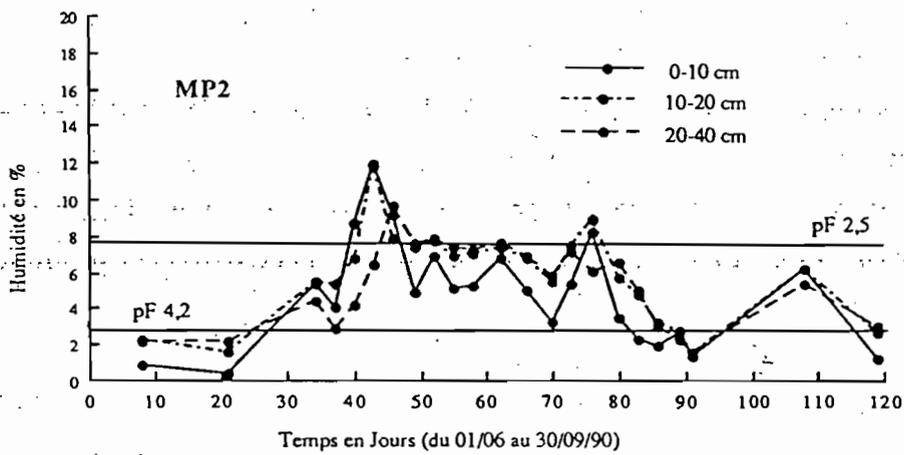
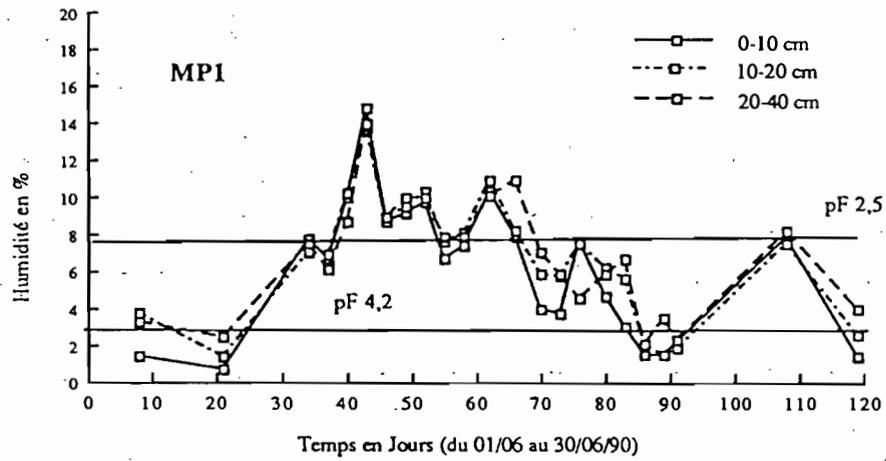
La première période qui va du 9 au 22 juin est caractérisée par des taux d'humidité inférieurs au pF 4,2. La couche 0-10 cm, plus sèche, se distingue nettement de la couche 10-40 cm.

La deuxième période, plus humide avec des taux d'humidité supérieurs au pF 4,2, dure de fin juin au 20 août. Les plus fortes valeurs sont atteintes vers le 15 juillet puis à partir de cette date, l'humidité diminue progressivement. Dans les sols cultivés, l'humidité est plus élevée dans les 20 premiers centimètres mais après le 15 juillet, la couche 10-40 cm est plus humide. Dans le sol de jachère, par contre, l'ensemble de la couche 0-40 cm présente une humidité assez homogène avec cependant, des valeurs légèrement plus élevées en profondeur.

La troisième période s'étale entre le 20 août et le 9 septembre et se caractérise par une diminution plus accentuée de l'humidité jusqu'au pF 4,2. Elle concerne l'ensemble de la couche 0-40 cm pour MP2 et seulement les 20 premiers centimètres pour MP1 et MP3.

La quatrième période, enfin, dure pratiquement 2 semaines (10 au 15 septembre) et correspond à une sensible remontée des taux d'humidité au-dessus du pF 4,2.

Figure VII.2 : Variation de l'humidité du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture



1.2. Sol de bas de pente

Les résultats sont représentés sur la figure VII.3.

Toutes profondeurs confondues, l'humidité du sol varie de 0,60 à 15,3 % pour le sol de jachère récente BP1, de 0,98 à 14,2 % pour le sol cultivé sans labour BP2 et de 0,92 à 15,3 pour le sol cultivé avec labour BP3.

La variation des taux d'humidité au cours de la saison est la même que celle qui a été observée pour le sol de mi-pente avec quatre périodes.

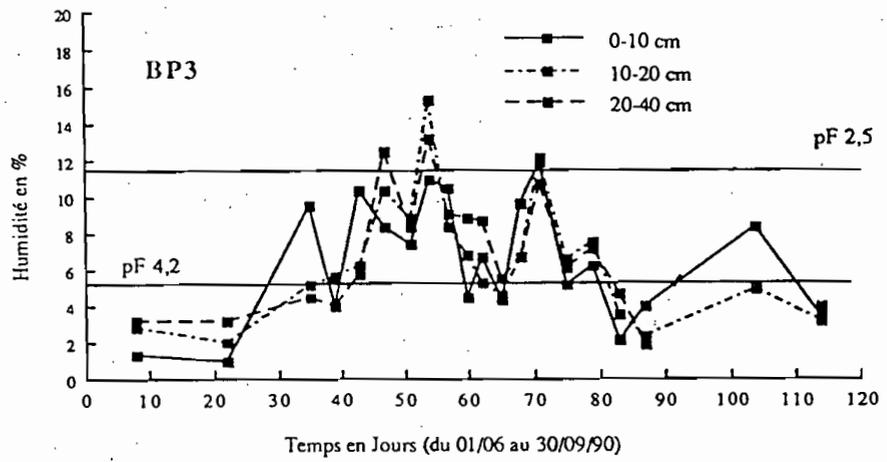
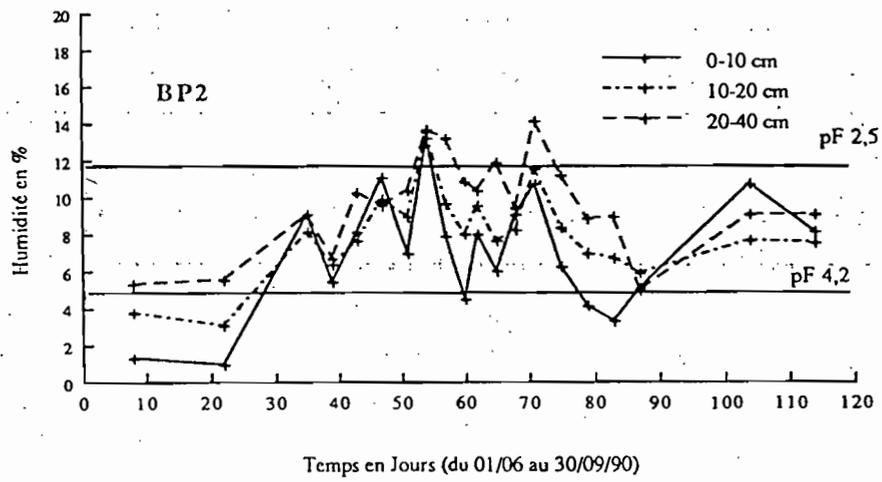
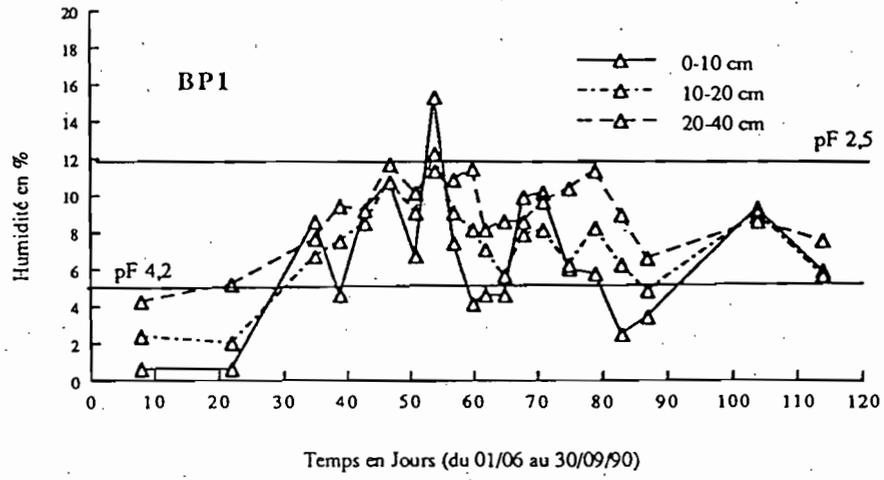
Pendant la première période (9 au 22 juin), seuls les 20 premiers centimètres des sols BP1 et BP2 ont une humidité en dessous du pF 4,2 (5,6 % en moyenne) alors que pour BP3 c'est l'ensemble de la couche 0-40 cm qui est concernée.

La deuxième période (22 juin au 20 août) se caractérise par des taux d'humidité très variables surtout dans les 10 premiers centimètres. Pour ce dernier en effet, l'humidité baisse jusqu'au niveau du pF 4,2 à certaines dates. On observe également au cours de cette période des niveaux maximaux où l'humidité est au-dessus du pF 2,5.

La troisième période (20 au 30 août), marquée par une diminution de l'humidité du sol en dessous du pF 4,2, concerne la couche 0-10 cm de BP1 et BP2 et l'ensemble de la profondeur 0-40 cm de BP3.

La quatrième période correspond à une remontée de l'humidité au-dessus du pF 4,2 dans les BP1 et BP2 alors que pour BP3, seul la couche 0-10 cm est humide.

Figure VII.3 : Variation de l'humidité du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture



1.3. Sol de bas-fond

Les résultats sont représentés sur la figure VII.4.

En raison de la faible pluviométrie, les sols de bas-fond n'ont pas été inondés au cours de la saison.

Les taux d'humidité varient de 2,5 à 22,9 % pour le sol forêt galerie dégradée BF1 et de 4,0 à 23,8 pour le sol cultivé BF2.

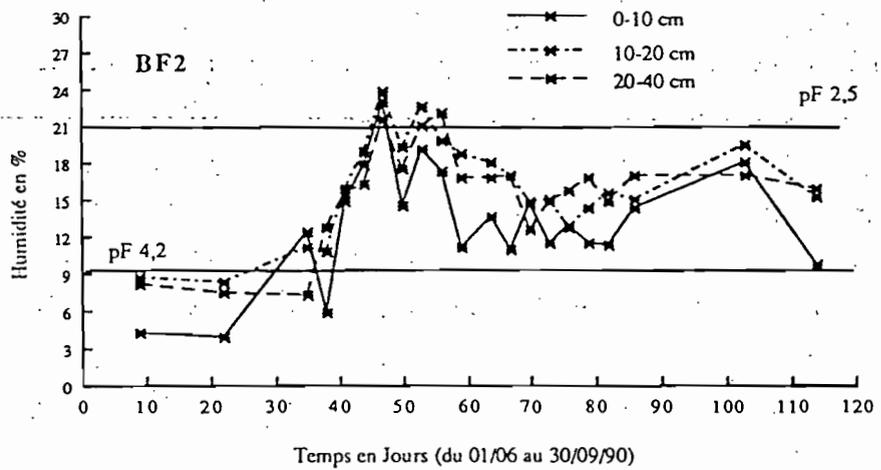
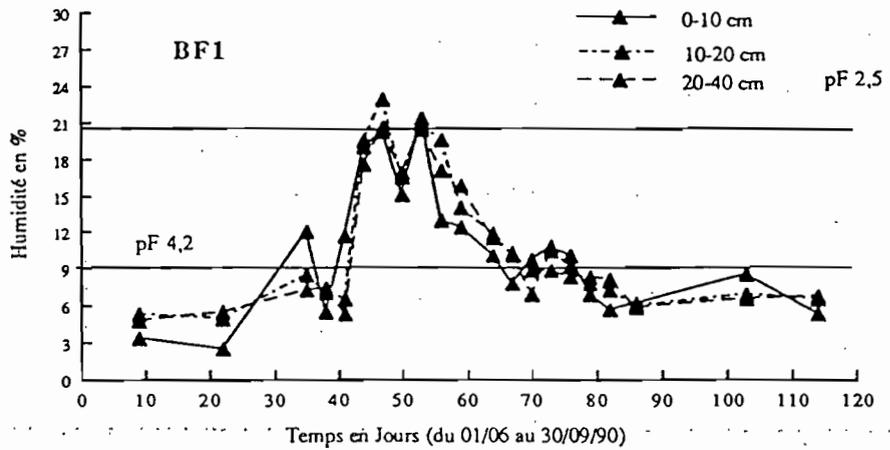
Le sens de variation de l'humidité au cours de la saison est comparable dans BF1 et BF2 mais l'amplitude diffère, en particulier dans la deuxième partie de la saison.

Dans le sol sous forêt galerie dégradée BF1, on distingue trois périodes. La première période est, comme dans les sols de mi-pente et de bas de pente, caractérisée par des taux d'humidité inférieurs au pF 4,2 (9 %). La deuxième période qui correspond à une humidité au-dessus du pF 4,2 et parfois au-dessus du pF 2,5, va du 10 juillet au 20 août. Enfin la troisième période, où le sol est de nouveau sec, dure le reste de saison (20 août au 25 septembre). Les variations verticales de l'humidité sont faibles avec cependant, des valeurs légèrement plus élevées en profondeur.

Dans le sol cultivé, on note deux périodes. La première période est similaire à celle de la forêt galerie dégradée. La période humide où l'humidité se maintient au-dessus de pF 4,2, dure le reste de la saison. L'humidité dans les 10 premiers centimètres est plus faible et plus variable que celle de la couche 10-40 cm.

Cette différence de comportement entre les deux sols, peut être expliquée par la présence d'une végétation abondante sur BF1, qui augmente l'évapotranspiration et assèche le sol. Alors qu'en BF2 la consommation en eau plus modérée du sorgho se traduit par des valeurs d'humidité du sol qui restent supérieures au pF 4,2.

Figure VII.4 : Variation de l'humidité du sol de bas-fond (BF) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture



2. SAISON PLUVIEUSE DE 1989

La saison des pluies de 1989 a connu une pluviométrie à peu près normale avec 552,3 mm. Elle a commencé dès début juin mais il a fallu attendre le 25 juin pour avoir une pluie de plus de 20 mm. La figure VI.5 indique que seules les 2^{ème} et 3^{ème} décades d'août ont enregistré une pluviométrie supérieure à l'évapotranspiration potentielle (ETP), montrant ainsi un risque de drainage pendant cette période.

Le suivi de l'humidité a commencé le 16 juillet (près de 50 jours après les premières pluies), jusqu'au 25 septembre.

2.1. Sol de mi-pente

Les résultats sont représentés sur la figure VI.6.

Les taux d'humidité pondérale du sol, toutes profondeurs confondues, varient de 1,8 à 14,5 % pour le sol de jachère MP1, de 3,1 à 11,1 % pour le sol cultivé sans labour ni aménagement antiérosif MP2 et de 2,6 à 12,6 % pour le sol cultivé avec labour et aménagement.

Dans les trois sols, l'humidité de la couche 0-10 cm est plus variable alors que la variation est plus faible dans la couche 10-40 cm.

La comparaison des résultats avec l'humidité au pF 4,2 (3,6 % en moyenne) permet de distinguer deux phases de dessèchement correspondant aux prélèvements de fin juillet et de fin septembre et une période humide (juillet et août). Les prélèvements de fin juillet et de fin septembre ont été effectués respectivement après 13 et 20 jours consécutifs sans pluies. Pour les prélèvements de juillet, l'humidité en surface du sol MP2 (0-10 cm) et MP1 (0-20 cm) est voisine du pF 4,2. Ce niveau n'est pas atteint dans le sol MP3 qui a été labouré une semaine plus tôt. Concernant la période humide qui dure pratiquement deux mois (juillet et août), l'humidité est voisine ou supérieure au pF 2,5.

2.2. Sol de bas de pente

Pendant la saison culturale de 1989, l'étude a porté sur le sol cultivé avec une faible fumure sans labour BP2 et sur le sol cultivé avec labour et une forte fumure organique BP3. Par rapport au sol précédent, le suivi a commencé 10 jours plus tôt (8 juillet). Les résultats sont illustrés par la figure VI.7.

Les taux d'humidité, toutes situations confondues, varient de 1,0 à 13,6 % pour BP2 et de 1,5 à 15,6 % pour BP3.

Figure VII.5 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle décadaires à Bidi de mai à octobre 1989

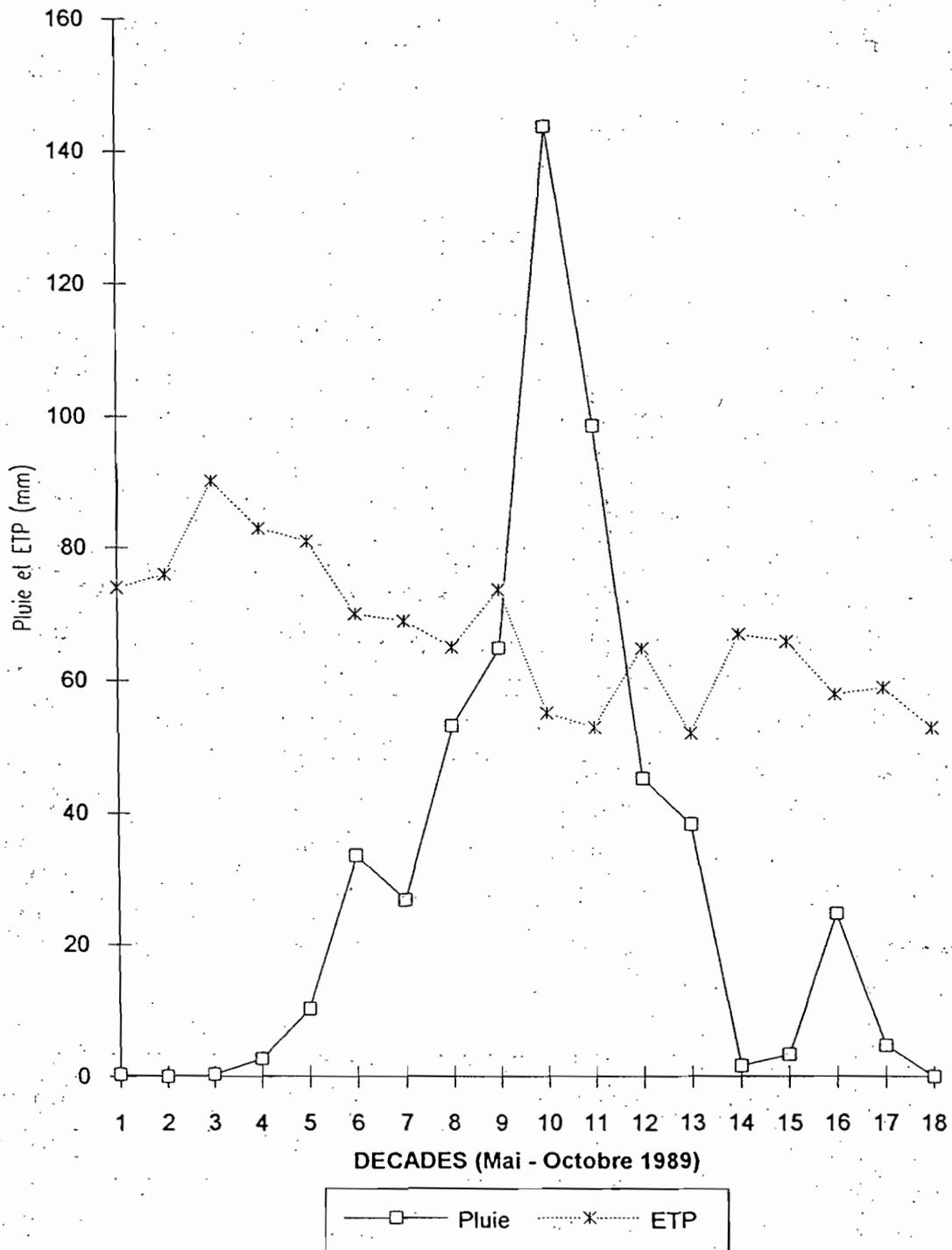


Figure VII.6 : Variation de l'humidité du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture

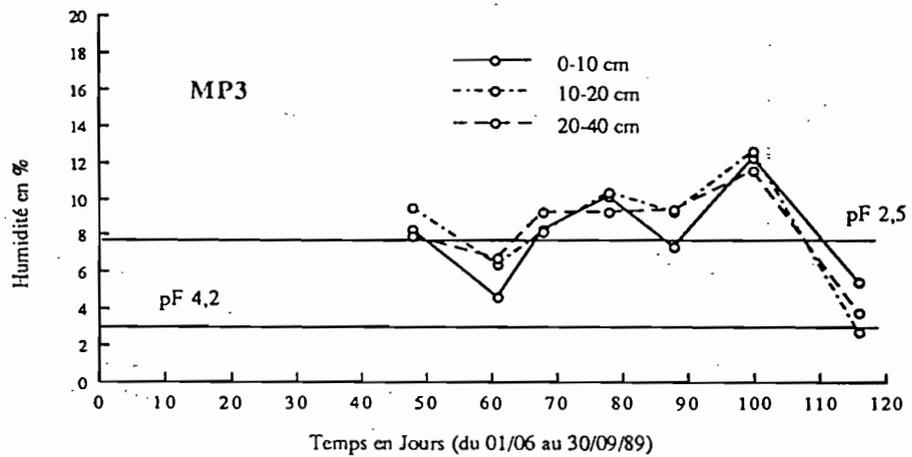
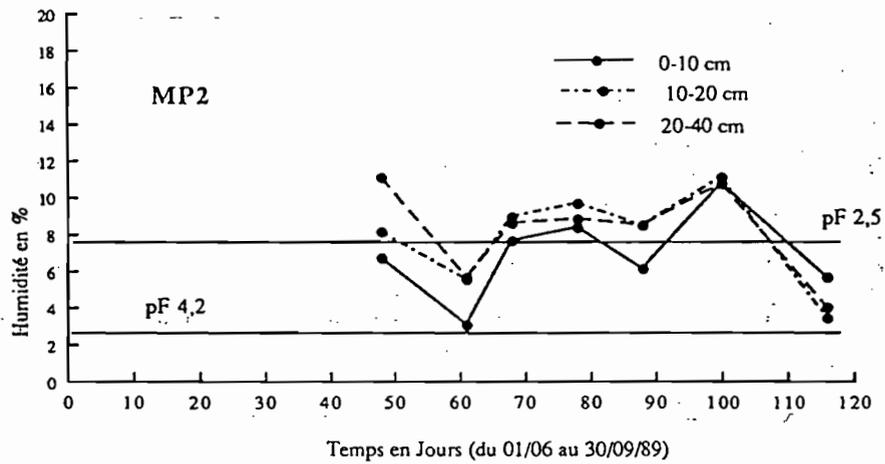
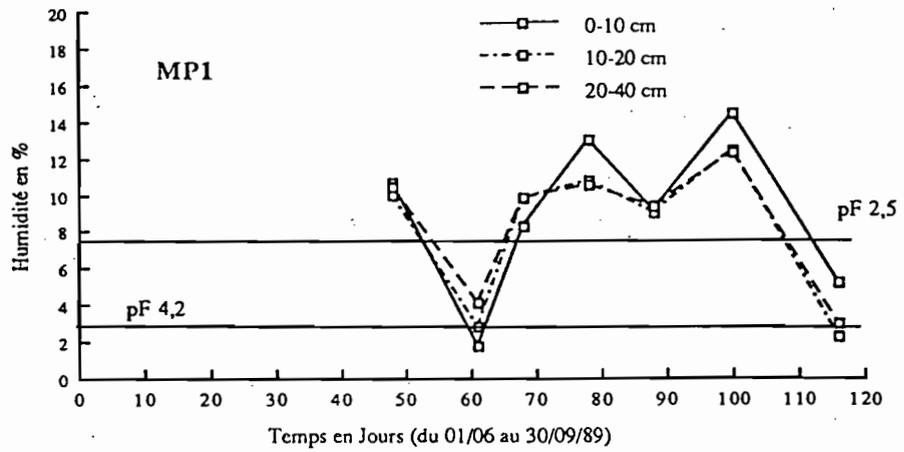
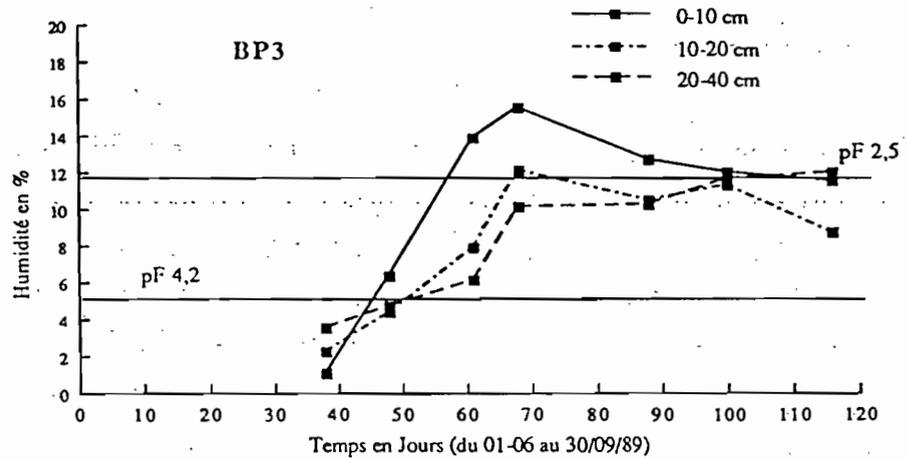
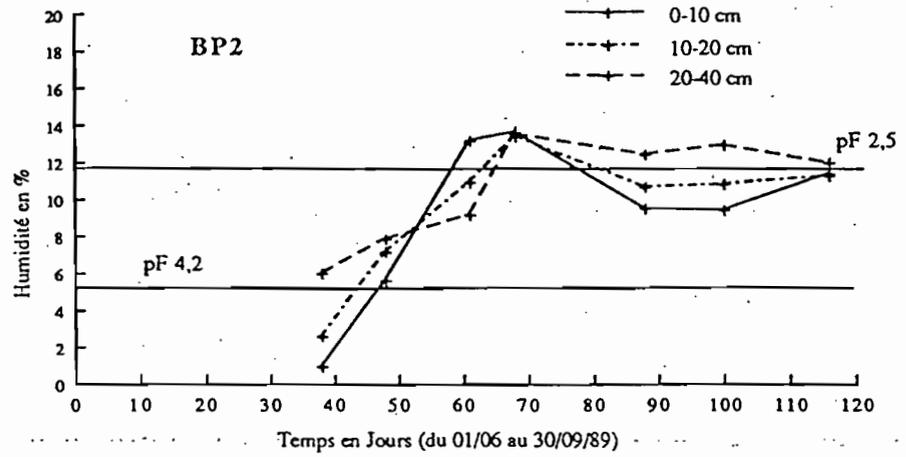


Figure VII.7 : Variation de l'humidité du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture



La variation au cours de la saison montre une brève période sèche entre le 8 et 16 juillet qui se caractérise par une humidité inférieure à pF 4,2 (5,6 % en moyenne) avec des horizons de surface plus secs. L'humidité s'accroît ensuite relativement vite pour se maintenir à des valeurs voisines ou supérieures au pF 2,5 jusqu'à la fin de la saison. Au cours de cette période, c'est dans la couche 0-10 cm que l'humidité est la plus variable.

La différence entre les systèmes de culture s'observe surtout au niveau des taux d'humidité des couches 0-10 cm d'une part et 10-20 et 20-40 cm d'autre. Dans le sol BP2, les taux d'humidité augmentent d'une façon générale, avec la profondeur. Le contraire est observé dans le sol BP3 où la couche de surface 0-10 cm se distingue nettement des deux autres (10-20 et 20-40 cm) d'humidité plus faible. Ceci peut s'expliquer par une mauvaise infiltration due à la présence d'un volume compact (A21c) dans BP3 (cf. chapitre III) et par une évapotranspiration plus élevée dans les couches de profondeur, du fait d'un système racinaire du mil plus développé sur cette parcelle.

3. CONCLUSION

Les résultats montrent qu'au cours d'une saison pluvieuse, l'humidité des sols varie en fonction de la répartition des pluies suivant trois périodes.

La première période correspond au début de la saison pluvieuse, variable d'une année à l'autre (mai/juin). Les premières pluies entraînent une humectation des couches de surface (20 à 40 premiers centimètres), puis l'irrégularité des pluies pendant cette période créent des poches de sécheresse conduisant de nouveau à un dessèchement du sol en particulier pour les couches les plus superficielles (0-10 ou 0-20 cm). L'humidité est d'une façon générale au-dessous du pF 4,2.

La seconde période correspond à l'installation et le développement de la saison avec des pluies plus fréquentes. L'humidité du sol atteint des valeurs égales ou supérieures au pF 2,5. La durée de cette période et l'importance de l'humidité du sol dépendent de l'intensité et de la fréquence des pluies, variables d'une année à l'autre. En 1989, année pluvieuse, la période humide s'étale sur plus de deux mois (15 juillet à fin septembre) avec des taux d'humidité des sols plus élevés et des inondations dans le bas-fond (engorgement temporaire). Par contre, en année sèche comme celle de 1990, la période humide est ponctuée par de brèves périodes de déficit hydrique (surtout dans la couche de surface). Les sols portant les végétations les plus abondantes (MP1, BP3 et BF1), sont les plus secs en raison de la plus forte évapotranspiration.

La troisième période correspond à la fin de la saison des pluies, avec des pluies de nouveau irrégulières. Elle varie également d'une année à l'autre et se caractérise par une baisse de l'humidité par rapport à la deuxième période. Mais l'humidité est d'une façon générale plus importante que celle de la première période.

Cette tendance est observée dans tous les sols quel que soit le système de culture. Les différences entre les systèmes s'expriment au niveau des taux d'humidité atteints pendant chaque période.

Cette évolution de l'humidité du sol au cours de la saison des pluies détermine les principales phases du calendrier cultural et commande en particulier la période de semis. En effet, les semis commencent généralement dès les premières pluies de juin. Mais l'irrégularité des pluies pendant la 1^{ère} période entraîne souvent une mauvaise levée ou la mort des pousses. Cela conduit à des resemis jusqu'à au début de la 2^{ème} période ; et d'une façon générale, c'est autour du 15 juillet que tout démarre bien en année normale. La même chose est observée pour la végétation spontanée qui, pourtant, pousse relativement vite dès les premières pluies. Les plus fortes exigences des cultures interviennent au cours de la 2^{ème} et de la 3^{ème} période où elles peuvent être facilement satisfaites en année de pluviométrie moyenne (comme celle de 1989). Ce qui n'est pas le cas en année de faible pluviométrie comme celle de 1990.

La réhumectation des sols après une longue saison sèche et la variation de l'humidité au cours de la saison des pluies auraient des conséquences sur les processus biologiques et physico-chimiques qui commandent l'évolution de l'azote minéral dans le sol. Dans le chapitre VIII, nous étudierons l'évolution saisonnière de l'azote minéral au cours de la saison des pluies de 1989 et 1990 sur les 8 parcelles étudiées.

CHAPITRE VIII

VARIATION DES TENEURS EN AZOTE MINERAL DES SOLS AU COURS DE LA SAISON DE CULTURE

Les processus microbiologiques à l'origine de la transformation de l'azote organique conduisent dans un premier temps à la libération d'azote ammoniacal NH_4^+ qui, par la suite, peut être oxydé en azote nitrique NO_3^- , en fonction des conditions pédoclimatiques. L'azote minéral du sol se trouve fréquemment sous ces deux formes (NH_4^+ et NO_3^-).

L'objet de ce chapitre est d'étudier l'évolution des teneurs en azote ammoniacal et nitrique des sols, au cours de deux saisons de pluies (1989 et 1990).

1: RESULTATS

1.1. Saison culturale de 1990

1.1.1. Sol de mi-pente

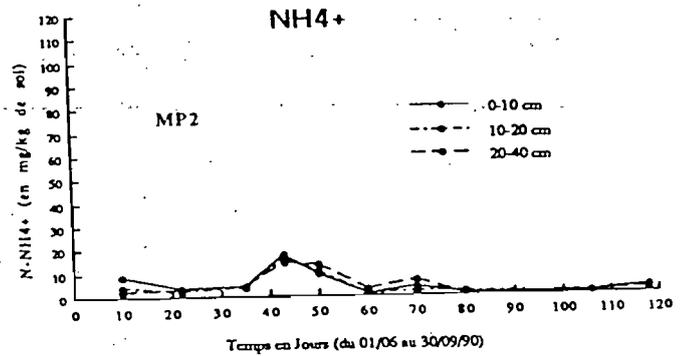
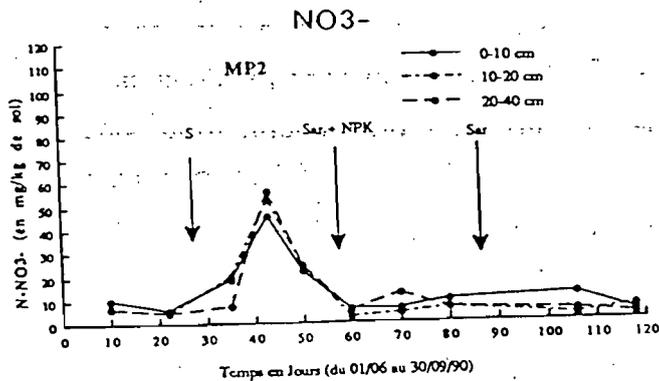
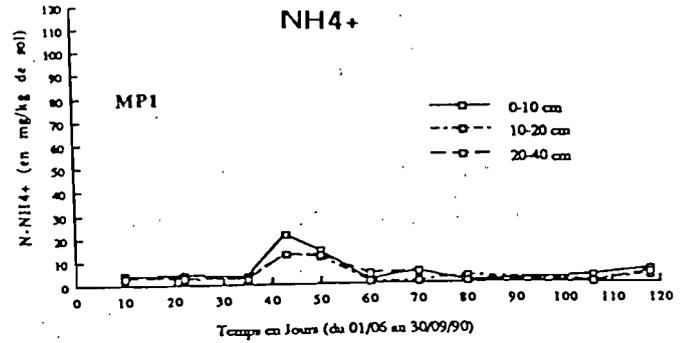
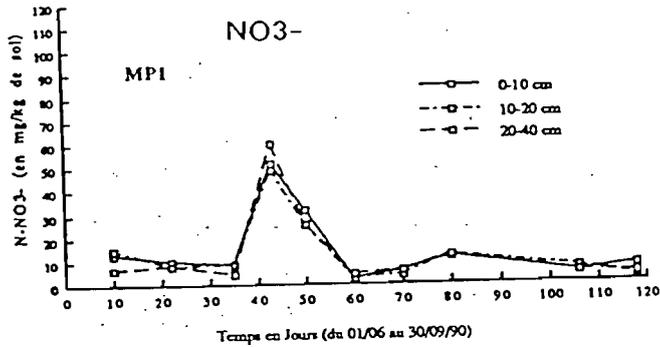
La variation des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ est représentée sur la figure VIII.1.

Les résultats indiquent la présence des deux formes d'azote minéral tout au long de la saison. Les nitrates sont prédominants quelle que soit la date de prélèvement. Toutes situations confondues, les teneurs varient de 1,8 à 60,0 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 0 à 21,2 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

La variation des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ au cours de la saison montre quatre phases.

La première phase va du 9 juin au 5 juillet pour le sol de jachère MP1 et le sol cultivé avec labour MP3 mais s'arrête au 22 juin pour le sol cultivé sans labour MP2. Elle se caractérise par des teneurs en NO_3^- constantes ou en légère diminution avec des valeurs relativement plus élevées dans la couche de surface. Les teneurs en NH_4^+ suivent une variation similaire sauf pour MP3 dont les teneurs de la couche 0-10 cm augmentent sensiblement le 22 juin (20 mg/kg de sol) avant baisser le 5 juillet (1,6 mg/kg de sol). Les quantités d'azote varient, toutes profondeurs confondues, de 2,8 à 15,2 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 1,6 à 8,1 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

Figure VIII.1 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture

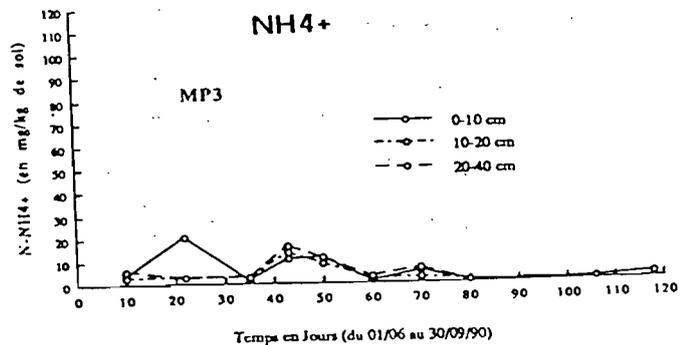
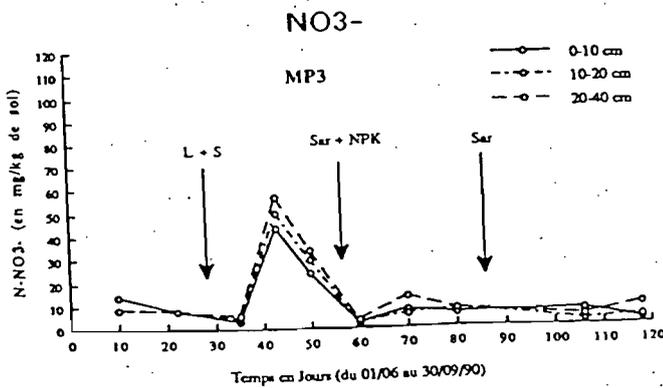


Engrais NPK

L = Labour

Sar = sarclage

S = semis



La deuxième phase s'étale entre le 5 au 15 juillet pour MP1 et MP3 alors qu'elle commence 10 jours plus tôt pour MP2. Elle se caractérise par une brutale augmentation des teneurs en azote minéral avec apparition d'un pic. Les teneurs atteignent 43,0 à 60,0 mg/kg de sol pour NO_3^- contre 10,8 à 21,2 mg/kg de sol pour NH_4^+ . Dans les deux sols cultivés, les teneurs sont relativement plus élevées en profondeur.

La troisième phase correspond à une rapide diminution des teneurs en azote minéral entre le 15 et 30 juillet. En deux semaines les teneurs retombent entre 1,8 et 5,5 mg/kg de sol pour NO_3^- contre 0 et 6,4 mg/kg de sol pour NH_4^+ . Dans les sols cultivés les teneurs sont plus élevées en profondeur (10-40 cm). Celles de la jachère sont pratiquement à un même niveau dans les 3 profondeurs.

La quatrième phase, la plus longue, dure près de deux mois (août et septembre). Elle se caractérise par des teneurs plus faibles variant dans les mêmes limites que celles de la première phase. Les teneurs en NO_3^- varient de 1,8 à 13,6 mg/kg de sol et celles en NH_4^+ de 0 à 5,5 mg/kg de sol. Les valeurs sont presque identiques sur l'ensemble de la profondeur sauf dans MP2 où l'horizon de surface comporte des teneurs légèrement plus élevées.

Ces résultats montrent, qu'à l'exception de la première phase où la couche 0-10 cm du sol MP3 présente un pic d'ammonification, l'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) suit la même variation au cours de la saison culturale et ce, quel que soit le système de culture. Il existe cependant, des différences quantitatives variables en fonction de la date de prélèvement. Mais d'une façon générale, les teneurs en azote minéral total sont sensiblement plus élevées dans le sol de jachère MP1 (3,3 à 73,0 mg/kg de sol) que dans le sol cultivé MP2 (1,8 à 70 mg/kg de sol) et MP3 (2,1 à 73,0 mg/kg de sol).

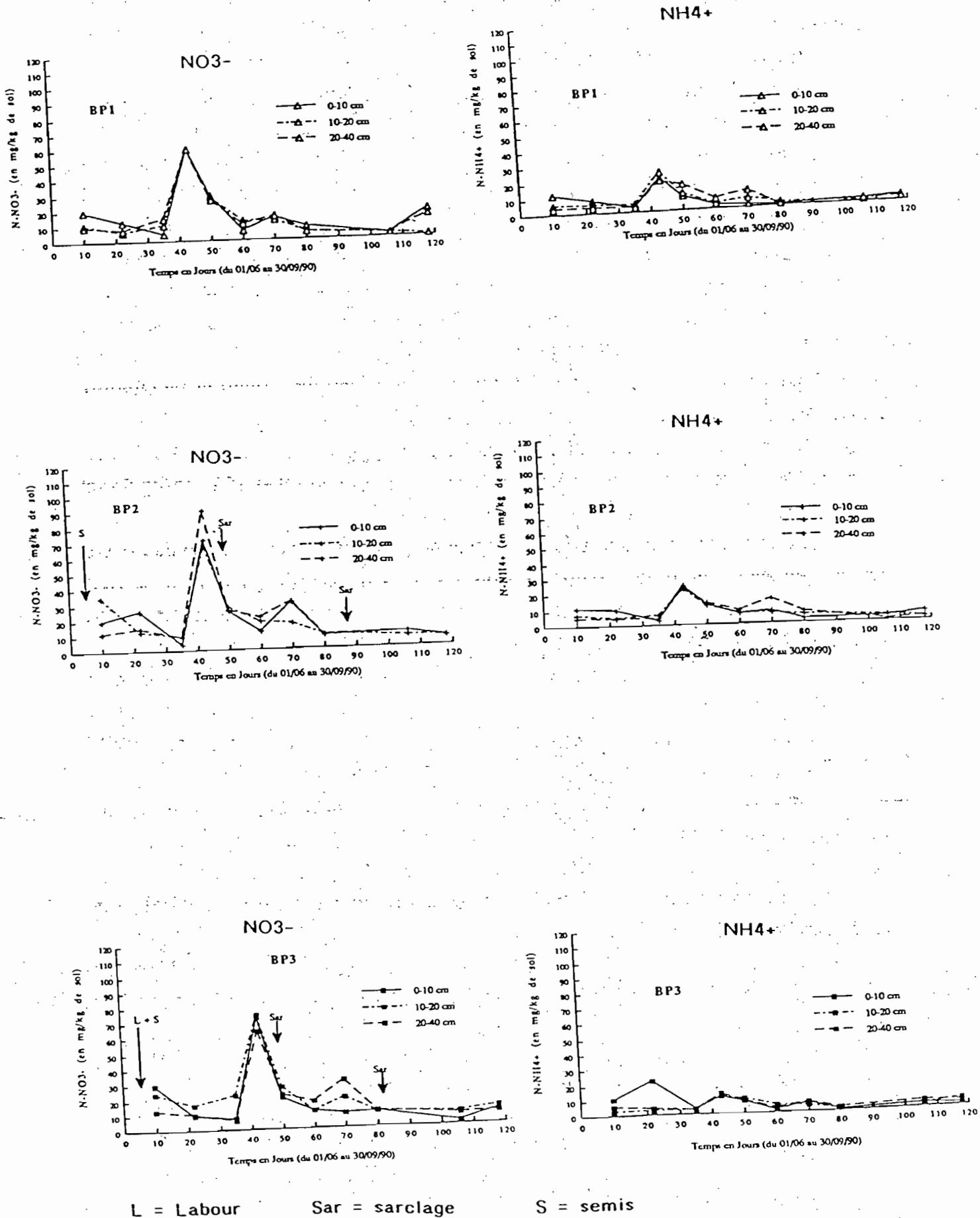
1.1.2. Sol de bas de pente

La variation des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ est illustrée par la figure VIII.2.

Comme dans le sol de mi-pente, les deux formes de l'azote minéral sont présentes durant tout le cycle cultural. L'azote NO_3^- est prédominant avec des teneurs variant de 2,2 à 74,6 mg/kg de sol. Celles de NH_4^+ vont de 0 à 25,1 mg/kg de sol.

La variation des teneurs au cours de la saison comporte comme précédemment, quatre phases.

Figure VIII.2 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture



La première phase s'étale entre le 10 juin et le 5 juillet et se caractérise par des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ à peu près constantes ou en légère diminution. La baisse des teneurs est plus marquée dans la couche de surface (0-10 cm). On observe cependant, dans le sol BP3 une augmentation des teneurs en NH_4^+ . D'une manière générale les teneurs en NH_4^+ sont plus faibles dans la couche 10-40 cm alors que la variation verticale est peu nette pour NO_3^- . Toutes situations confondues, les teneurs varient de 4,3 à 34,6 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 2,6 à 22,5 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

La deuxième phase qui va du 5 au 15 juillet est marquée par une augmentation brutale des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ . Le pic d'azote minéral correspond est 59,3 à 90,3 mg/kg de sol pour NO_3^- contre 11,2 à 25,1 mg/kg de sol pour NH_4^+ . La variation verticale est très faible.

La troisième phase dure 2 semaines (15 au 30 juillet) et correspond à une diminution des teneurs qui atteignent un niveau minimum variant de 5,6 à 20,2 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 1,4 à 8,3 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

La quatrième phase, plus longue, dure le reste de la saison (août et septembre). Après une légère augmentation vers le 10 août, les teneurs en NO_3^- et NH_4^+ varient dans les mêmes limites que celles de la première phase avec une tendance à la baisse. Elles varient entre 2,2 et 30,6 mg/kg de sol pour NO_3^- et entre 0 et 15,2 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

Ces résultats montrent une similitude du sens de variation saisonnière des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ dans les trois systèmes de culture BP1, BP2 et BP3. Cependant au cours de la première phase, la couche 0-10 cm du sol BP3 montre un pic d'ammonification. Mais les différences entre les systèmes de culture concernent essentiellement le niveau des teneurs. En comparant les valeurs extrêmes, les teneurs en azote minéral total ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) sont relativement plus élevées dans le sol BP2 (6,0 à 113,0 mg/kg de sol) que dans le sol BP3 (4,0 à 85,8 mg/kg de sol) et sous jachère (3,2 à 83,7 mg/kg de sol).

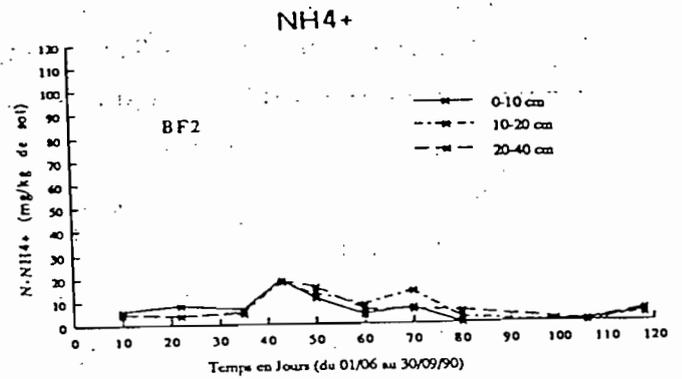
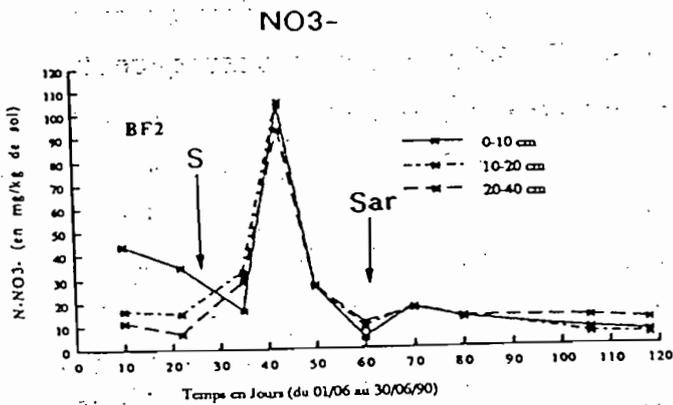
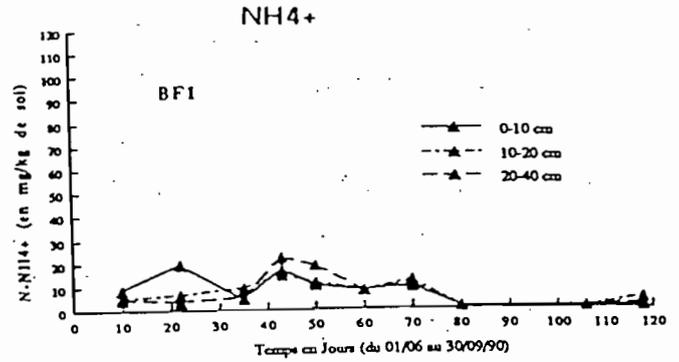
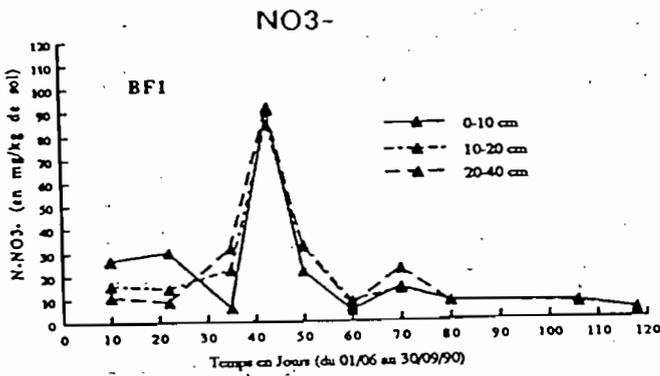
1.1.3. Sol de bas-fond.

Les teneurs en NO_3^- et NH_4^+ des sols au cours de la saison culturale sont représentées sur la figure VIII.3.

Dans ce sol également, les résultats révèlent la présence de NO_3^- et NH_4^+ tout au long du cycle cultural avec une prédominance de NO_3^- . Les teneurs varient de 4,1 à 105,0 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 0 à 21,7 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

La variation des teneurs au cours de la saison comporte quatre phases comme dans les sols de mi-pente et de bas de pente.

Figure VIII.3 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de bas-fond (BF) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture



Sar = sarclage

S = Semis

La première phase qui va du 9 au 22 juin, se caractérise par des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ peu variables, et plus élevées dans la couche 0-10 cm que dans les couches sous-jacentes. Toutes profondeurs confondues, les teneurs varient de 6,3 à 43,5 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 3,6 à 18,9 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

La deuxième phase correspond à une rapide augmentation des teneurs en azote minéral entre le 22 juin et 15 juillet. Les teneurs en NO_3^- atteignent 84,0 à 106,0 mg/kg de sol contre 14,0 à 22,0 mg/kg de sol pour celles en NH_4^+ . La variation verticale est assez faible avec des valeurs légèrement plus élevées en profondeur.

La troisième phase dure 2 semaines (15 au 30 juillet) et est marquée par une diminution des teneurs. Les teneurs descendent entre 4,0 et 10,5 mg/kg de sol pour NO_3^- et entre 0 et 7,6 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

La quatrième phase qui est la plus longue, s'étale sur le reste de la saison (août et septembre). Après une légère augmentation vers le 10 août, les teneurs en NO_3^- et NH_4^+ tendent à diminuer progressivement. Elles varient de 3,8 à 21,9 mg/kg pour NO_3^- et de 0 à 13,7 mg/kg de sol pour NH_4^+ .

Les résultats montrent une similitude dans le sens de variation des teneurs en azote minéral dans le sol sous forêt galerie dégradée BF1 et sol cultivé BF2. Les différences, variables suivant la date de prélèvement, portent sur les quantités d'azote minéral. Une comparaison des valeurs extrêmes montre que les teneurs en azote minéral total sont relativement plus élevées dans le sol cultivé (5,3 à 121,5 mg/kg de sol) que dans le sol sous forêt galerie dégradée (4,7 à 113,4 mg/kg de sol).

1.1.4. Conclusion

Les résultats révèlent que le sens de variation *in situ* de l'azote minéral au cours de la saison culturale de 1990 est similaire dans les trois types de sols étudiés (mi-pente, bas de pente et bas-fond). Le fait marquant dans cette évolution est l'apparition d'un pic d'azote minéral entre le 5 et 30 juillet.

La différence entre les trois types de sols porte surtout sur le niveau des teneurs. D'une manière générale, la quantité d'azote minéral total augmente du sol de mi-pente (2,1 à 73,0 mg/kg de sol) au sol de bas-fond (4,7 à 121,5 mg/kg de sol). Le sol de bas de pente a des teneurs intermédiaires variant de 3,2 à 113,0 mg/kg de sol.

1.2. Saison pluvieuse de 1989

1.2.1. Sol de mi-pente

La variation des teneurs en azote ammoniacal (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-) sont représentées sur la figure VIII.4.

Les résultats révèlent la présence, bien que très faible, des deux formes d'azote minéral tout au long du cycle cultural avec une prédominance de NO_3^- . Toutes situations confondues, les teneurs varient de 0 à 15,7 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 0 à 4,0 mg/kg de sol pour NH_4^+ . D'une façon générale, les teneurs sont relativement plus élevées en profondeur (20-40 cm) qu'en surface.

Dans chaque sol et à une profondeur donnée, la variation des teneurs au cours de la saison est faible. Cependant, c'est en fin de saison, que les teneurs sont plus faibles.

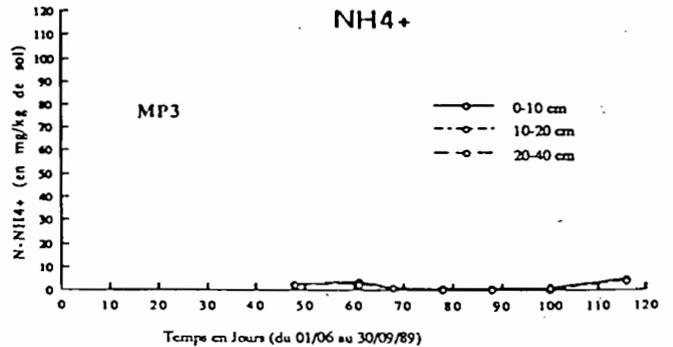
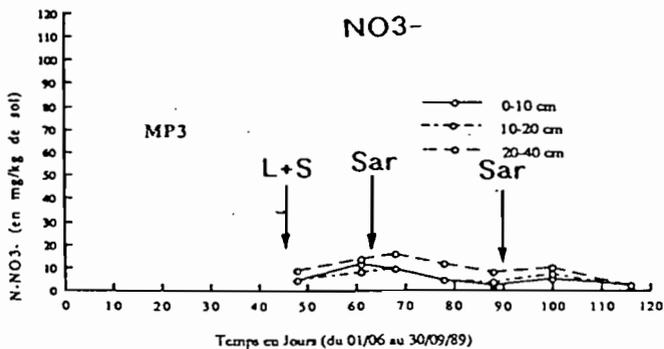
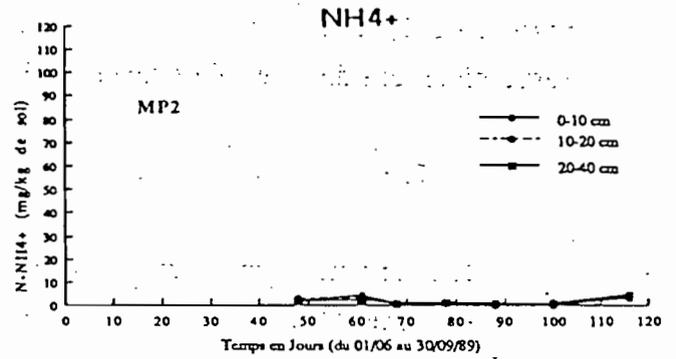
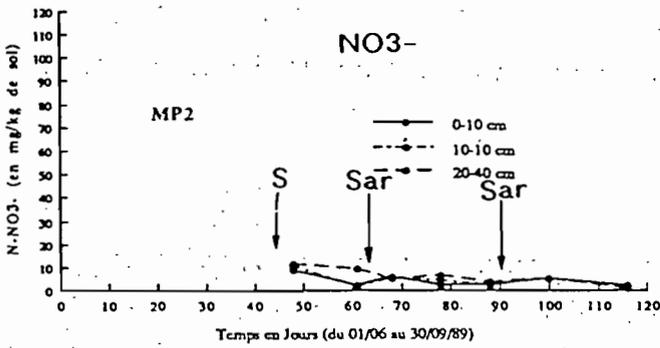
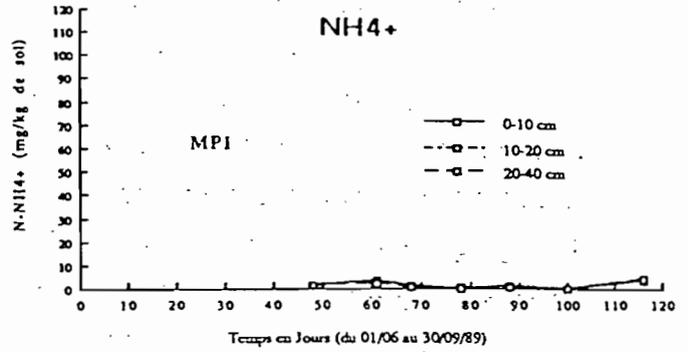
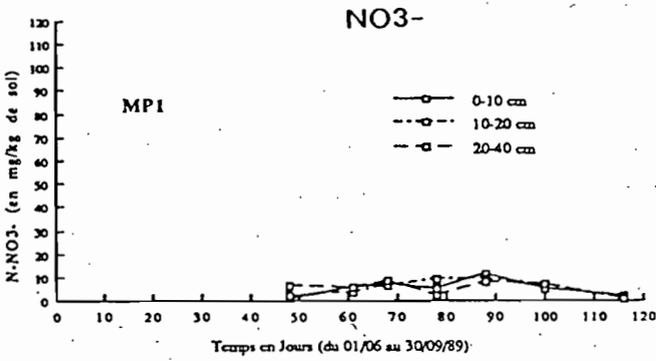
La comparaison des systèmes de culture montre qu'en plus de la similitude l'évolution saisonnière, les teneurs en azote minéral ne présentent pas une grande différence quantitative. Les valeurs sont cependant, légèrement plus élevées dans le sol cultivé avec labour et aménagement antiérosif MP3. Les teneurs en azote minéral total varient de 1,9 à 15,7 mg/kg de sol pour MP2 contre 0 à 11,4 et 0 à 9,4 mg/kg de sol respectivement dans le sol de jachère MP1 et le sol cultivé sans labour ni aménagement.

1.2.2. Sol de bas de pente

Les teneurs en azote minéral des sols sont représentées dans la figure VIII.5

Comme pour le sol de mi-pente, les résultats indiquent la présence de NO_3^- et NH_4^+ tout au long du cycle cultural avec toujours une prédominance de NO_3^- . Les teneurs varient, toutes situations confondues, de 2,1 à 55,7 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 0,3 à 8,5 mg/kg de sol pour NH_4^+ . Elles sont relativement plus élevées en profondeur.

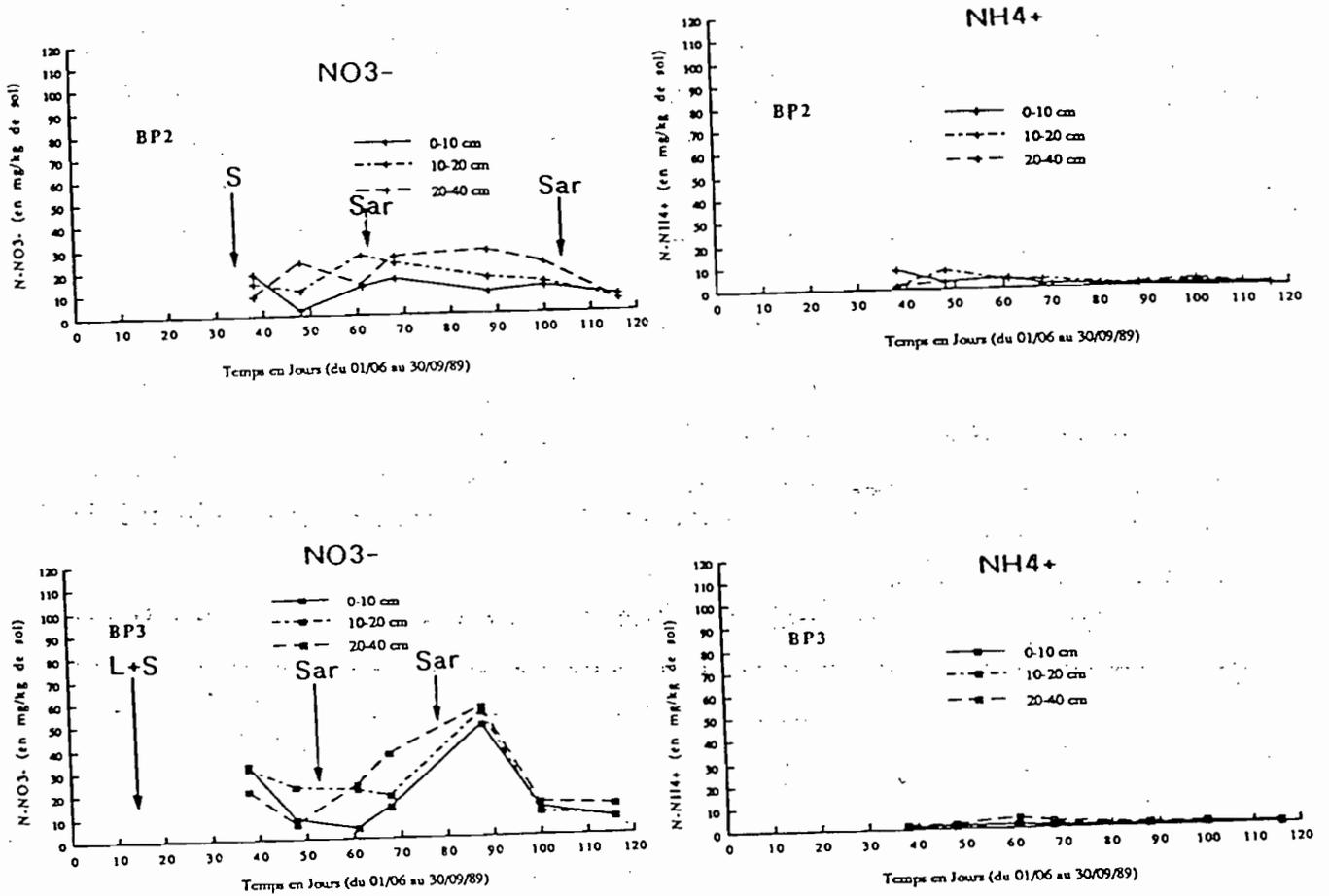
Figure.VIII.4 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture



L = Labour Sar = sarclage

S = Semis

Figure VIII.5 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture



L = Labour

Sar = sarclage

S = Semis

La variation des teneurs en nitrates au cours de la saison montre une différence entre le sol cultivé avec une faible fumure organique sans labour BP2 et le sol cultivé avec une forte fumure organique et labour BP3 plus riche en matière organique et azote minéralisable (chapitre V). Les teneurs en azote minéral total sont plus élevées dans le sol BP3 (5,7 à 56,8 mg/kg de sol) que dans le sol BP2 (4,6 à 28,7 mg/kg de sol). Dans le sol BP2, la variation est faible avec une tendance à la baisse en fin de saison. On observe cependant, dans la couche 0-10 cm, une baisse sensible des teneurs entre le 5 et 18 juillet suivie d'une légère augmentation en fin juillet. Pour le sol BP3, les teneurs plus élevées de NO_3^- dans toutes les couches par rapport à BP2, la baisse dans la couche 0-10 cm est plus importante et dure jusqu'en fin juillet. Après cette date, les teneurs augmentent de façon notable avec l'apparition, en fin août, d'un pic (48 à 55,2 mg/kg de sol) dont la phase descendante est assez brutale.

1.2.3. Conclusion

Pour les deux sols, les résultats révèlent la présence des deux formes d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) avec une prédominance des nitrates. Au cours de la saison (18 juillet au 25 septembre), à l'exception du sol BP3, où un pic d'azote est observé, la variation des teneurs est assez faible.

La différence entre les deux sols porte surtout sur le niveau des teneurs. Les résultats montrent que les teneurs en azote minéral total sont plus élevées dans le sol de bas de pente, où elles varient de 4,6 à 56,8 mg/kg de sol, que dans le sol de mi-pente, où elles varient de 0 à 15,7 mg/kg de sol.

2. DISCUSSION

2.1. Quelques aspects de la dynamique de l'azote minéral au champ

Plusieurs processus déterminent l'apparition (minéralisation) ou la disparition (réorganisation, lixiviation, dénitrification et absorption par les plantes) de l'azote minéral dans le sol.

2.1.1. Minéralisation de l'azote

Selon BLONDEL (1971) ; BERNHARD-REVERSAT (1981) ; PICHOT *et al.* (1981) et RAGHUBANSHI (1991), la minéralisation de l'azote au cours de la saison de pluies, est contrôlée par l'humidité du sol. SANCHEZ (1976) rapporte qu'elle est sensible à un changement significatif, même très court, des conditions hydriques. C'est ainsi que l'alternance du dessèchement et de la réhumectation se montre très favorable à la minéralisation. Dans les situations étudiées, l'humidité du sol et son évolution au cours des deux saisons s'avèrent favorables à la minéralisation. Plusieurs auteurs (DOMMARGUES et MANGENOT, 1970 ; BLONDEL, 1971a et PICHOT *et al.*, 1974 et 1981) montrent que dans la zone, la minéralisation est particulièrement élevée en début de saison pluvieuse après les premières pluies.

En dehors de la minéralisation endogène, l'azote minéral du sol peut provenir des ruissellements et de l'érosion. Mais un enrichissement du sol suppose une infiltration de l'eau chargée. Ceci peut se produire dans les sols de bas-fond, lieu de concentration des eaux de ruissellement.

2.1.2. Réorganisation

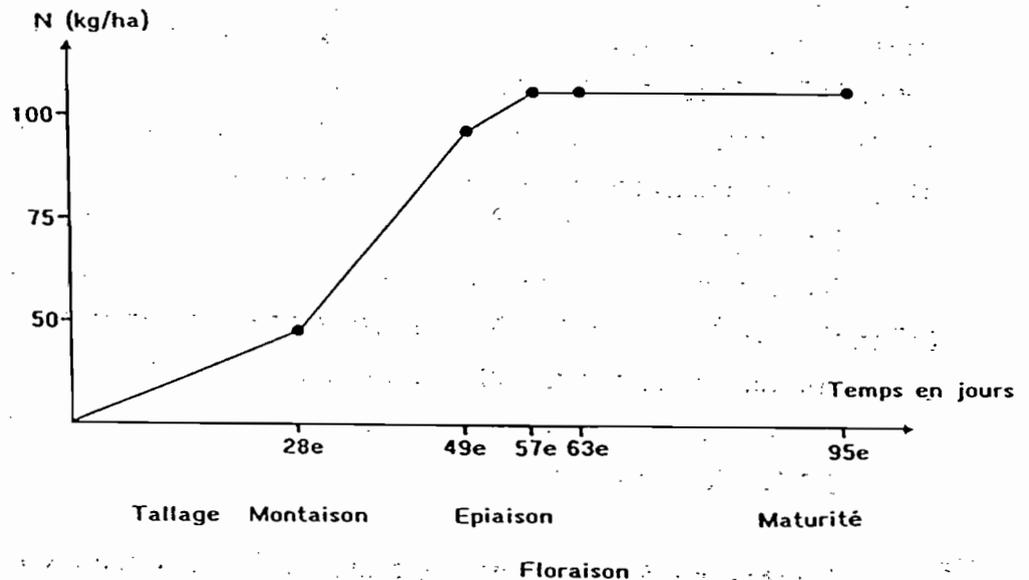
L'azote minéral produit au cours de la minéralisation est réutilisé par la microflore pour les synthèses microbiennes. La réorganisation de l'azote minéral dépend de l'activité biologique et du rapport C/N du sol. DE RIDDER *et al.* (1982) rapportent qu'elle est plus importante pour des valeurs du rapport C/N supérieures à 16. Dans les sols étudiés, le rapport C/N ne dépasse pas ce seuil. Cependant l'hétérogénéité de la répartition de la matière organique peut entraîner la présence de microsites à C/N élevé.

2.1.3. Absorption par les plantes

L'alimentation azotée des plantes dépend d'une part de l'humidité du sol favorable surtout au cours de la période humide et d'autre part de leur stade phénologique. La quantité d'azote absorbé à un stade donné sera fonction de la densité des plantes.

La figure VIII.6 (BLONDEL, 1971a) représentant la mobilisation de l'azote par une culture de mil, montre que la consommation est élevée surtout pendant les phases de la montaison et de l'épiaison. Les fortes demandes en azote minéral se situent d'une façon générale pendant la 3^{ème} phase de l'évolution de l'azote. Nous reviendrons sur cet aspect dans le paragraphe 2.3.

Figure VIII.6 : Mobilisation de l'azote par une culture de mil en fonction de son stade phénologique (D'après BLONDEL, 1971a)



2.1.4. Lixiviation

L'azote minéral du sol en particulier l'azote NO_3^- , peut être entraîné en profondeur puis hors du profil par les eaux de drainage. La lixiviation a lieu pendant les épisodes pluvieux où la pluviométrie devient supérieure à l'ETP. Dans le cas présent, c'est pendant la 3^{ème} décade de juillet et les 1^{ère} et 2^{ème} décades d'août qu'il y a un risque de drainage.

Cependant, notre suivi n'ayant concerné que les 40 premiers centimètres, il est possible que l'azote minéral soit entraîné au delà de cette profondeur avec la descente du front d'humectation, sans que cela constitue une perte pour le sol. L'azote minéral peut rester dans le profil exploré par le système racinaire. Ce phénomène peut être observé pendant toute la période humide (cf. chapitre VII) où les taux d'humidité sont parfois supérieurs à pF 2,5.

2.1.5. Dénitrification

La transformation biologique de l'azote NO_3^- en nitrite (NO_2^-) ou en azote moléculaire (N_2) est le principal processus de dénitrification dans le sol (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970). Elle se produit en condition d'anaérobiose et en présence de l'azote NO_3^- et de substrat carboné. La dénitrification a surtout lieu dans les cas d'excès d'eau mais aussi dans les sols bien drainés qui comportent des microhabitats où règnent des conditions favorables. Pour les sols étudiés, les risques de dénitrification sont plus importants dans le sol de bas-fond qui connaît des engorgements temporaires en saison humide.

2.1.6. Conclusion

L'ensemble des processus conduisant à l'apparition de l'azote minéral dans le sol (minéralisation) ou sa disparition (réorganisation, lixiviation, dénitrification et absorption par les plantes), vont s'exprimer différemment au cours de la saison et en fonction des types de sols et de systèmes de culture.

2.2. Evolution des teneurs en azote minéral des sols au cours de la saison de culture

En 1990 le suivi a couvert presque toute la saison de culture. Les résultats montrent que l'évolution comporte 4 phases bien distinctes quelle que soit la situation.

La première phase.

Les premières pluies irrégulières permettent une certaine humectation des couches de surface (humidité variant autour de pF 4,2). Ce changement d'humidité survenant après une longue saison sèche, entraîne une reprise de l'activité biologique. L'azote minéral produit, en l'absence de végétation et de pluies, va s'accumuler ou, au contraire, être réorganisé. C'est ce qui explique la tendance à la baisse des teneurs en azote minéral.

La deuxième phase.

Avec l'installation effective de la saison des pluies en juillet, l'humidité du sol s'accroît (parfois au-dessus du pF 2,5) et se trouve plus favorable à la minéralisation de l'azote ; un pic de minéralisation est observé 20 jours après la reprise des pluies. Ce flush de minéralisation en début de saison a été observé par plusieurs auteurs (GREENLAND, 1958 ; BIRCH, 1960 ; BLONDEL, 1971a ; PICHOT *et al*, 1974 ; BERNHARD-REVERSAT, 1977 et GIGOU, 1983). Ils l'attribuent à un effet de la

dessiccation au cours de la saison sèche qui provoque une augmentation des teneurs en azote facilement minéralisable et de l'activité biologique avec la réhumidification du sol.

Troisième phase.

Elle se caractérise par une baisse importante et rapide des teneurs en azote minéral. Pendant cette phase, l'absorption par les plantes (stade levée à début tallage) est encore faible et l'humidité se situe encore à des valeurs voisines ou supérieures à pF 2,5. Les causes des pertes seraient : la lixiviation au-delà de 40 cm avec la fréquence des pluies, la dénitrification consécutive à la dégradation structurale dont ces sols font l'objet sous les pluies violentes de début de saison et qui pourrait entraîner localement des conditions d'anaérobiose, la réorganisation sur place de l'azote minéral du fait de l'accroissement de l'activité biologique. Toutefois, les pertes par dénitrification ou lixiviation devraient se traduire à terme, par un appauvrissement en azote total de la couche de surface avec ou non enrichissement des couches en profondeur. Or on observe que la couche de surface est toujours plus riche en azote total. Ce qui laisse penser à une prédominance de la réorganisation même si la lixiviation peut l'emporter lors des épisodes pluvieux.

Quatrième phase.

Elle est caractérisée par de faibles teneurs en azote minéral avec des taux d'humidité décroissant jusqu'à des valeurs voisines ou inférieures à pF 4,2. Pendant cette phase les besoins azotés des plantes et les risques de lixiviation et de dénitrification sont importants. Cette faiblesse des teneurs peut s'expliquer aussi par le fait qu'au cours de la saison de culture, l'azote potentiellement minéralisable diminue comme l'ont montré BONDE et ROSSWALL (1987) en milieu tempéré.

En 1989, le suivi a commencé tardivement c'est à dire 18 jours après la reprise des pluies. Les résultats montrent que la variation de l'azote minéral au cours de cette période, est similaire à la 4^{ème} phase de celle observée en 1990. Les phases de forte minéralisation et de disparition de l'azote minéral consécutives à la reprise des pluies, n'ont pu être observées celles-ci étant très rapides (BLONDEL, 1971a et GIGOU, 1983).

On peut donc conclure à une similitude d'évolution de l'azote minéral au cours eux saisons. Des observations similaires ont été faites par (BLONDEL, 1971a ; PICHOT, *et al.*, 1974 ; BERNHARD-REVERSAT, 1977 et GIGOU, 1983) dans la zone concernée.

2.3. Effet du type de sol sur la minéralisation nette au champ

Les résultats montrent que, quel que soit le type de sol, l'évolution des teneurs en azote minéral au cours de la saison des pluies est comparable. Ce qui révèle le caractère saisonnier de cette dynamique et confirme l'influence déterminante des conditions hydriques. Des observations similaires ont été faites au Maroc (SOUDI et CHIANG, 1989). Cette dynamique est également indépendante de la position topographique du sol. RAGHUBANSHI (1991) rapporte des résultats similaires en Inde.

Il existe cependant, des différences quantitatives entre les trois sols. Elles sont variables au cours de la saison mais les valeurs extrêmes montrent une augmentation des teneurs en azote minéral du sol de mi-pente à celui du bas-fond (mi-pente < bas de pente < bas-fond). Cette différence peut s'expliquer par les teneurs en azote total qui suivent le même classement. Le drainage plus limité dans les sols de bas de pente et de bas-fond peut aussi réduire la lixiviation au delà de 40 cm de profondeur. *A contrario*, la réorganisation, la fixation de l'azote NH_4^+ sur les argiles et la dénitrification, de plus en plus importantes dans les sols à texture fine et mal drainés (PENNOCK *et al.*, 1992) ont pu atténuer les différences entre les sols.

2.4. Effet des systèmes de culture et des opérations culturales sur la minéralisation nette de l'azote au champ

Le sens général d'évolution de l'azote minéral au cours de la saison des pluies n'est affecté ni par les systèmes de culture ni par les opérations culturales. Des observations similaires ont été faites par BLONDEL (1971a), PICHOT *et al.* (1974) et GIGOU (1983).

Les différences entre les situations portent plutôt sur les quantités d'azote minéral qui varient en fonction de la date de prélèvement et du type de sol. Celles-ci peuvent s'expliquer par le fait que les systèmes de culture affectent les caractères des sols, en particulier leurs teneurs en matière organique et en azote qui, elles-mêmes, vont influencer sur les quantités d'azote minéralisé comme cela a été montré au chapitre V. Mais au cours de la saison, les opérations culturales telles que la fumure organique et le sarclage en apportant de la matière organique au sol, ont aussi un rôle important.

La différence de teneurs en azote minéral entre systèmes de culture pour un sol donné, est plus faible que celle existant entre les trois sols. Ceci semble montrer que l'effet des caractéristiques des sols sur la minéralisation est plus important que celui des opérations culturales au cours de la saison. Cependant, le sarclage peut entraîner une augmentation des teneurs en azote minéral s'il permet, en plus de l'ameublissement de

la couche de surface du sol, l'enfouissement des mauvaises herbes qui auront l'effet d'engrais vert. Cela pourrait expliquer le pic d'azote minéral observé en 1989 dans le sol BP3 (cf. fig. VIII.4)

Les résultats confirment, dans toutes les situations, le décalage entre la période de forte minéralisation (20 jours après la reprises des pluies) et celle où les besoins des plantes sont plus élevés (quatrième phase). Des observations similaires ont été faites par BLONDEL (1971a), PICHOT *et al.* (1974), GIGOU (1983) et POSS (1991).

2.5. Relation entre minéralisation nette de l'azote in situ et caractéristiques des sols

Les résultats de 1990 montrent que jusqu'au pic de minéralisation, l'absorption de l'azote minéral par les plantes est relativement faible, ces dernières (cultures et végétation herbacée) n'étant pas encore bien installées. On observe également que l'effet des conditions hydriques sur la minéralisation s'exprime de la même façon pour l'ensemble des situations étudiées. La minéralisation nette pendant cette période va donc dépendre surtout des caractéristiques des sols.

Nous avons calculé, pour les 10 premiers centimètres, les quantités d'azote minéral pendant les deux premières phases. C'est à dire jusqu'au pic de minéralisation. Les teneurs varient de 71,6 à 78,2 mg/kg de sol pour le sol de mi-pente, de 104,3 à 126,6 mg/kg de sol pour celui de bas pente et de 145,3 à 148,2 mg/kg de sol pour le sol de bas-fond. La mise en relation de ces valeurs avec certaines caractéristiques des sols (azote total, carbone total, argile + limon et pH) montre que les teneurs en éléments fins (argile + limon) sont les plus liées aux teneurs en azote minéral avec $r = 0,86$ significatif à 1 %. Cela s'expliquerait par le fait qu'en début de saison, la lixiviation de l'azote minéral est limitée dans les sols à texture fine moins drainants.

La corrélation entre la minéralisation nette et l'azote total est significative à 5 % ($r = 0,76$). Il en est de même avec le carbone total ($r = 0,74$). Ces résultats confirment bien le lien étroit entre la matière organique et la disponibilité en azote minéral des sols dans cette zone où la fertilisation minérale est quasiment absente. Pour chaque sol cependant, on observe que les systèmes de culture ayant les plus fortes teneurs en azote total (jachère MP1, culture avec forte fumure organique BP3 et forêt galerie dégradée BF1) ne présentent pas les teneurs en azote minéral les plus élevées. Ceci pourrait s'expliquer par la réorganisation microbienne qui augmente avec les teneurs en carbone organique total du sol ou par l'absorption de l'azote minéral par les plantes car, à cette période, chacune de ces trois parcelles porte plus de végétation que les autres pour le même sol.

3. CONCLUSION

Au cours de la saison culturale, les conditions hydriques des sols sont étroitement liées à la quantité et à la répartition des pluies. D'une façon générale, la saison pluvieuse se caractérise par deux périodes sèches intervenant en début (fin mai/juin) et en fin (septembre/début octobre) séparées par une période humide (juillet et août). Au cours de la période sèche dont la durée est variable en fonction des années, l'humidité du sol peut descendre en dessous du pF 4,2. La période humide est également variable d'une année à l'autre et peut présenter soit des phases de forte humidité du sol avec un risque de drainage, soit au contraire des poches de sécheresse avec des taux d'humidité proches du pF 4,2.

Sur le plan agricole, le calendrier cultural varie en fonction de la répartition des pluies, avec comme fait marquant la difficulté de démarrage de la saison culturale en raison des mauvaises levées. Mais d'une façon générale c'est au début de la période humide que le semis (ou resemis) réussit.

Concernant la minéralisation de l'azote, les résultats révèlent la présence de l'azote minéral tout au long de la saison de culture avec une prédominance des nitrates. La variation des teneurs en azote minéral passe cependant par quatre phases bien distinctes qui sont étroitement liées à l'évolution des conditions hydriques au cours de la saison.

En début de saison (fin mai/juin), les premières pluies déclenchent la minéralisation de l'azote qui reste cependant modérée, peut-être en raison de la période sèche qui suit généralement les premières pluies ; les teneurs en azote minéral restent constantes ou diminuent jusqu'à la reprise des pluies en début juillet (**première phase**). Ensuite l'azote minéral augmente et atteint, deux à trois semaines après l'installation effective de la saison, un niveau maximum (**deuxième phase**). Ce pic de minéralisation est suivi par une chute brutale (une à deux semaines après le pic) des teneurs en azote minéral (**troisième phase**). Puis à partir de ce moment, les teneurs en azote minéral deviennent faibles et peu variables durant le reste de la saison alors que les besoins azotés des plantes sont maximaux (**quatrième phase**). Cette évolution s'explique à la fois par l'activité biologique et sa variation au cours de la saison, les conditions pédoclimatiques et par la croissance et le développement des plantes.

Le sens variation des teneurs en azote minéral n'est pas modifié par la nature du sol ni par les systèmes de culture. Cela semble montrer que la minéralisation de l'azote *in situ*, revêt un caractère saisonnier déterminé par la répartition des pluies dans l'année.

La comparaison des quantités d'azote minéral montre cependant des différences entre les trois sols d'une part et entre les systèmes de culture. Elles sont variables au cours de la saison mais les valeurs extrêmes indiquent une augmentation des teneurs en azote minéral avec les teneurs en éléments fins (argile + limon) et avec les teneurs en matière organique (carbone organique et azote totaux) du sol. Malgré ces différences, en dehors de la période du pic de minéralisation, les teneurs en azote minéral sont faibles dans tous les sols.

La comparaison de la minéralisation nette de l'azote au champ avec l'évolution des besoins azotés des plantes, montre un décalage entre la période où les teneurs en azote minéral sont élevées (2^{ème} et 3^{ème} phases) et le moment où les besoins azotés des cultures sont grands (4^{ème} phase). Dans ces conditions, une fumure minérale azotée au cours de la 4^{ème} phase, surtout pendant la partie où les conditions hydriques sont favorables, pourrait être utilisée avec le plus d'efficacité.

Dans la zone, c'est souvent la fumure organique (généralement sous forme de poudrette de fumier) qui est appliquée en début ou au cours de la saison de culture. La connaissance du rôle de ces apports sur la minéralisation de l'azote peut aider à l'amélioration de l'alimentation azotée des plantes dans ces agrosystèmes. La quatrième partie du mémoire sera consacrée à l'étude de l'évolution du carbone organique et azote totaux et de l'azote minéral, avec ou sans apport de matière organique.

Quatrième Partie

**ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE
ORGANIQUE ET DE L'AZOTE MINERAL DANS LE
SOL FERRUGINEUX SABLEUX DE MI-PENTE ET
DANS LE SOL HYDROMORPHE ARGILO-
LIMONEUX DE BAS-FOND**

INTRODUCTION DE LA QUATRIEME PARTIE

La matière organique joue un rôle important dans la fertilité chimique des sols de cette zone où la fumure minérale est quasi inexistante (PICHOT, 1975 ; SEDOGO, 1981 ; PICHOT *et al.*, 1981 ; PIERI, 1984 et 1989 et DE RIDDER *et al.*, 1991). Nous avons montré, dans les précédentes parties, que dans le cas de l'azote, la disponibilité de cet élément dépend des teneurs en matière organique des sols. Mais, à l'exception du sol de bas-fond sous forêt galerie dégradée, les sols en sont pauvres à très pauvres, même si des différences apparaissent selon les systèmes de culture. Ceci implique que toute amélioration du stock organique de ces sols exige des amendements organiques. Cela semble être bien compris par les paysans de la zone qui pratiquent de plus en plus la fumure organique en fonction des ressources disponibles.

L'objet de cette partie est d'étudier l'influence des principaux amendements organiques disponibles dans la région (poudrette de fumier et résidus de récolte) sur le stock organique des sols et la minéralisation nette de l'azote en fonction des conditions pédoclimatiques *in situ* et au laboratoire.

Après une présentation des différentes méthodes utilisées (chapitre IX), nous analyserons successivement la dynamique du carbone et de l'azote total dans les conditions pédoclimatiques de mi-pente et de bas-fond (chapitre X), celle de l'azote minéral (chapitre XI) et enfin la minéralisation nette de l'azote dans les conditions hydriques de bas-fond simulées au laboratoire (chapitre XII).

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes that this is essential for ensuring transparency and accountability in the organization's operations.

CHAPITRE IX

METHODOLOGIE

Dans ce chapitre sont présentées deux expériences d'incubation. L'une est conduite *in situ* dans les conditions du sol sableux de mi-pente et du sol argilo-limoneux de bas-fond. L'autre porte une simulation au laboratoire des conditions hydriques de bas-fond au cours de la saison pluvieuse.

1. INCUBATION IN SITU

1.1. Matériel

1.1.1. Caractères des sols

L'étude est menée dans les conditions pédoclimatiques de mi-pente (sol ferrugineux sableux, bien drainé) et de bas-fond (sol argilo-limoneux hydromorphe, inondable). Les caractéristiques des deux situations ont été précédemment décrites (chapitre II). Les sols utilisés étaient en culture continue de mil (mi-pente) et de sorgho (bas-fond). Les caractères analytiques de la couche 0-15 cm sont résumées dans le tableau IX.1.

1.1.2. Caractéristiques de la matière organique utilisée

Deux types de résidus organiques sont utilisés : la poudrette de fumier de parc et les résidus de récolte (paille de mil). Leurs caractéristiques chimiques sont regroupées dans le tableau IX.2.

On remarque que la poudrette de fumier qui a été prélevée dans un parc à bovins, est très riche en carbone car elle contient des débris végétaux non encore transformés ; d'où le rapport C/N assez élevé se rapprochant de celui de la paille de mil. Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, le fumier en milieu paysan est de nature très variée.

La paille de mil, constituée par l'ensemble tiges et feuilles, est relativement riche en azote parce qu'elle a été prélevée juste après les récoltes.

Tableau IX.1 : Quelques caractères analytiques de la couche 0-15 cm des sols incubés.

Caractéristiques chimiques	Sol sableux de mi-pente	Sol limono-argileux de bas-fond
Argile (%)	10,3 ± 0,4	37,5 ± 1,0
Limon fin (%)	2,5 ± 0,8	22,9 ± 2,1
Limon grossier %	1,6 ± 0,6	15,7 ± 1,4
Sable fin (%)	49,2 ± 3,3	23,5 ± 0,4
Sable grossier %	38,9 ± 2,7	0,4 ± 0,1
C total (%)	0,22	0,84
N total (‰)	0,21	0,76
C/N	10,5	11,1
Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	1,20 ± 0,04	1,62 ± 0,25
Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,36 ± 0,02	0,93 ± 0,18
K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,08 ± 0,01	0,19 ± 0,01
S (cmol.kg ⁻¹)	1,64 ± 0,06	2,78 ± 0,29
CEC (cmol.kg ⁻¹)	2,93 ± 0,13	4,43 ± 0,19
V=S/CEC (%)	56	64
pH eau	5,6	5,5
P2O5 total (mg/kg de sol)	53,4 ± 12,9	209,10 ± 13,5
P2O5 Assimilable DABIN (mg/kg de sol)	21,6 ± 0,3	28,8 ± 0,2

Tableau IX.2 : Quelques caractéristiques chimiques de la matière organique utilisée

Matière organique	C %	N %	C/N	P %	Ca %	Mg %	K %
Poudrette de fumier	38,2	1,44	26,6	0,35	0,51	0,69	2,38
Paille de mil	42,02	1,35	31,1	0,26	0,17	0,56	3,58

1.2. Méthode d'incubation

La méthode d'incubation s'inspire de celle utilisée par GODEFROY (1974) pour étudier la décomposition des résidus de bananier et d'ananas en Côte d'Ivoire. Le principe est le suivant : l'échantillon de sol, bien homogénéisé, est mélangé avec la matière organique dont on veut étudier la décomposition ; le mélange est mis dans des sacs à maille de 1 mm de 15 x 12 x 10 cm ; les sacs sont enfouis dans l'horizon supérieur du sol dans des conditions appréciées comme étant identiques ; ils sont déterrés les uns après les autres à des pas de temps variables pour la détermination des paramètres étudiés.

Le dispositif expérimental comprend trois (3) traitements en quatre (4) répétitions. Les traitements sont:

- To (témoin) = terre sans apport organique
- Tf = terre + poudrette de fumier
- Tp = terre + paille de mil broyée à 2 mm.

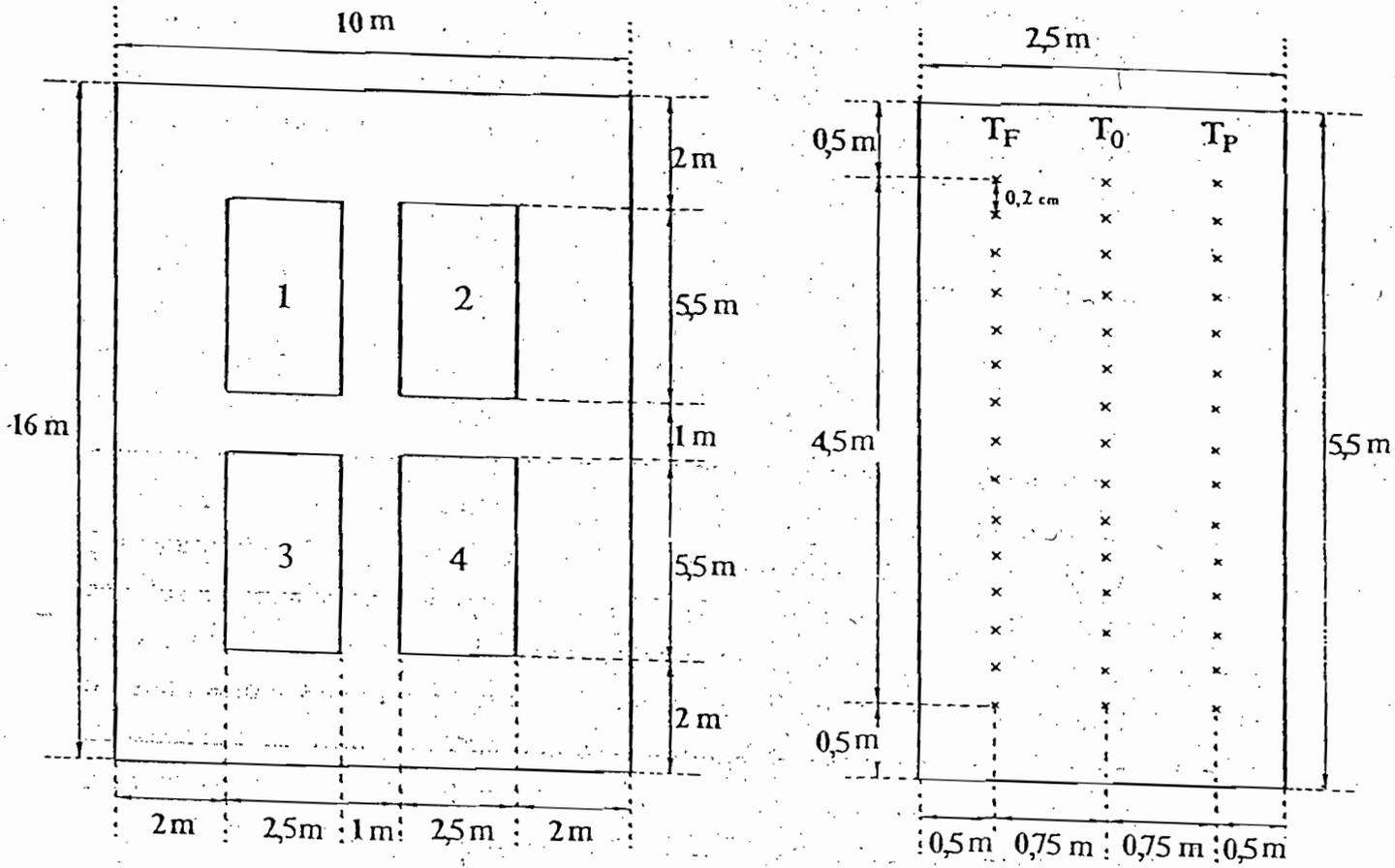
Le mélange sol / matière organique est fait de façon à apporter 1,3 g de C pour 100 g de sol. Ainsi, au kilogramme de terre mis dans un sac est ajoutée une quantité de fumier ou de paille de mil contenant 13 g de C. Soit 35,4 et 31,10 g de matière sèche (MS) respectivement pour le fumier et la paille.

Les doses de poudrette de fumier et de paille de mil apportées correspondent respectivement à 53 et 46 tonnes de matière sèche par hectare pour la couche 0-10 cm d'un sol de densité apparente moyenne de 1,5. Ces doses paraissent très élevées mais elles correspondent à la réalité de la fumure localisée telle qu'elle est de plus en plus pratiquée dans la zone. En effet, l'insuffisance du fumier conduit les paysans à concentrer le peu qu'ils ont (3 à 5 tonnes pour un hectare), juste dans les trous de semis.

Dans chaque répétition, 15 sacs correspondant à 15 dates de prélèvement sont enterrés par traitement. Soit 45 sacs au total par répétition. Les quinze prélèvements s'étalent sur deux saisons de pluies séparées par une saison sèche. A la première saison (1989) les intervalles de prélèvements sont de 7, 10 et 15 jours respectivement pendant le 1^{er}, 2^{ème} puis les 3 et 4^{ème} mois après la mise en terre. Un seul prélèvement a eu lieu au cours de la saison sèche. Pendant la seconde saison humide, les prélèvements sont intervenus chaque semaine durant un mois (juillet) puis une fois pendant le 2^{ème} mois. Le 15^{ème} et dernier prélèvement est fait à la fin de la saison humide après les récoltes.

Le dispositif (fig.IX.1) a été mis en place le 7 juillet 1989 sur une parcelle relativement homogène de 10 x 16 m délimitée, auparavant, à l'aide de sondages à la tarière. La mise en place s'est faite de la façon suivante:

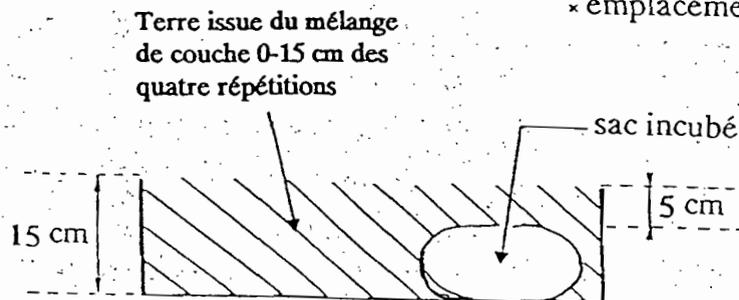
Figure IX.1 : Dispositif expérimental de l'incubation in situ



Dispositif expérimental à 4 répétitions

Dispositif d'une répétition

- T_0 = témoin sans matière organique
- T_F = terre + poudrette de fumier
- T_P = terre + paille de mil
- * emplacement des sacs



- 4 répétitions de 5,5 x 2,5 m ont été délimitées ;
- la couche de surface de chaque répétition est enlevée sur une profondeur de 15 cm et mis en tas ;
- de chaque tas est prélevé un échantillon de 150 kg environ pour constituer un échantillon composite qui sera mélangé à la matière organique ;
- le reste de la terre des 4 tas est mélangé et a servi à recouvrir les sacs placés au fond des fosses.

Un désherbage manuel a permis de garder la surface du sol nue pendant toute la durée de l'essai.

1.3. Conditions hydriques

L'humidité du sol est déterminée à chacun des prélèvements effectués au cours de la saison de pluies de 1989 et 1990. On rappellera que les deux saisons pluvieuses ont été séparées par une saison sèche de 7 mois (novembre à mai) au cours desquels l'humidité du sol est nettement au-dessous du pF 4,2.

Les résultats, représentés par la figure IX.2., montrent que l'humidité du sol dans les sacs enfouis, subit les effets de l'alternance des périodes humides et des périodes sèches qui caractérisent la saison pluvieuse dans cette région (cf. chapitre VII). Dans les bas-fonds des crues sont assez fréquentes en cas de grosses pluies mais ne durent pas plus de 48 heures. Cependant lors des épisodes très pluvieux, l'inondation peut durer plus longtemps comme cela a été le cas en 1989 où environ 10 jours d'inondation ont été enregistrés entre le 12 et le 25 août.

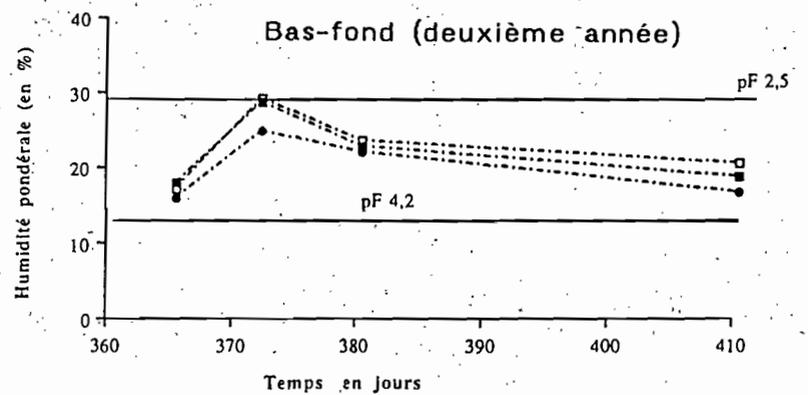
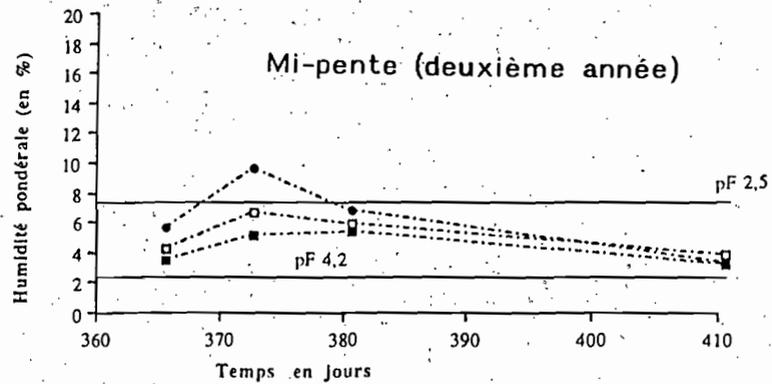
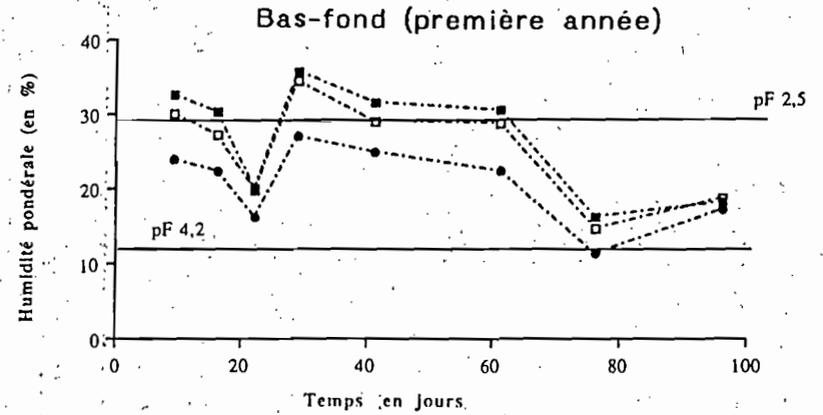
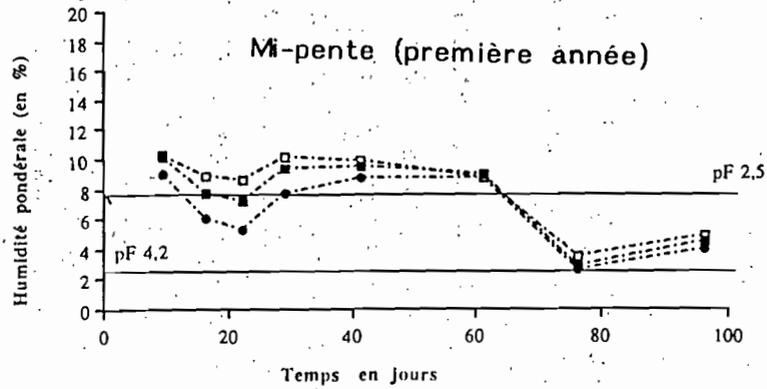
2. INCUBATION AU LABORATOIRE

2.1. Objectif

Les conditions hydriques des sols de bas-fond sont caractérisées par des phases:

- d' **humectation** avec l'arrivée de la saison des pluies après la longue saison sèche;
- d' **engorgement** et même de **submersion** (avec une lame d'eau) pendant les mois les plus pluvieux;
- de **dessèchement** qui intervient pendant les poches de sécheresse qui caractérisent les saisons des pluies de cette zone.

Figure IX.2 : Variation de l'humidité du sol dans les sacs incubés



- To Témoin
- Tf Fumier
- Tp Paille de mil

L'incubation en milieu contrôlé, a pour but de caractériser les effets de ces conditions hydriques, en particulier la phase d'engorgement pendant laquelle nous n'avons pas pu faire de prélèvements, sur la dynamique de l'azote minéral dans le sol de bas-fond enrichi, ou non, en matière organique (poudrette fumier).

2.2. Matériel et méthode

Les phases hydriques étudiées sont :

- la phase d'*humectation normale* (H) au cours de laquelle l'humidité du sol est maintenue à 60 % de la capacité au champ ;
- la phase de *submersion* (S) pendant laquelle les échantillons sont submergés, l'excès d'eau formant une lame de 5 mm d'épaisseur ;
- la phase de dessèchement (D) qui comprend deux modalités : un *dessèchement lent* (DL) qui permet de ramener progressivement l'humidité des échantillons en dessous de 60% de la capacité au champ au bout de 3 semaines et un *dessèchement rapide et intense* (DR) qui ramène, en 1 ou 2 jours, l'humidité des échantillons au niveau précédant l'incubation (< 1 %).

Les traitements constitués à partir de la combinaison de ces phases hydriques sont :

traitement A (TA) = H (6 semaines) ;

traitement B (TB) = S (6 semaines)

traitement C (TC) = H (2 semaines) + S (4 semaines)

traitement D (TD) = H (2 semaines) + S (1 semaine) + DL (3 semaines)

traitement E (TE) = H (2 semaines) + S (1 semaine) + DR (3 semaines).

Tous ces traitements sont conduits avec et sans apport de fumier de parc. Les caractéristiques du sol et du fumier sont celles précédemment décrites. La dose apportée est la même que dans l'incubation *in situ*.

La méthode d'incubation s'inspire de celle utilisée par ROCHESTER *et al.* (1991) pour étudier la dynamique de l'azote minéral dans un sol argileux hydromorphe de rizière. Dans un bécher en plastique de 100 ml, on met 60 g de sol tamisé à 2 mm et on ajoute la quantité d'eau distillée nécessaire pour amener l'échantillon de sol à l'humidité correspondant à chaque condition étudiée. L'expérience est conduite avec 3 répétitions de chaque traitements, soit un total 112 échantillons mis en incubation. Les bécchers sont couverts de parafilm perforé et placés dans l'incubateur ventilé à 30 °C.

L'incubation a duré 6 semaines au cours desquelles des bécchers sont sacrifiés à des pas de temps variables, pour le dosage de l'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-). Pour

les traitements A et B, les dosages ont été réalisés 1, 2, 4, et 6 semaines après mise en incubation. Pour les autres traitements les dosages sont effectués à la fin de chaque phase du cycle hydrique.

3. DETERMINATIONS ANALYTIQUES

L'azote minéral a été extrait par KCl 1 M après chaque prélèvement comme dans le cas du suivi au champ. La méthode de dosage est celle qui est utilisée au chapitre VII pour le sol de bas-fond. Par contre, pour le sol de mi-pente dont les extraits (traitements fumier et paille de mil) présentaient une coloration brune, nous avons utilisé la méthode de double distillation. Dans ce cas l'azote ammoniacal est dosé par distillation alcaline en présence de magnésie. L'azote nitrique est dosé sur la même partie aliquote après réduction des nitrates par l'alliage de DEWARDA. L'ammoniac recueilli dans une solution d'acide borique est titré avec de l'acide sulfurique N/50 en présence d'indicateur.

Concernant l'incubation *in vitro*, le dosage de l'azote minéral a été fait selon la méthode décrite au chapitre V.

Le carbone organique et l'azote totaux ont été dosés selon les méthodes décrites précédemment.

Un fractionnement granulométrique en trois fractions 2000-200, 200-50 et < 50 μm , réalisé selon la méthode utilisée au chapitre IV, a été effectué sur les échantillons de sol prélevés 8 et 505 jours après la mise en incubation (JAI).

4. METHODE D'AJUSTEMENT

La cinétique de décomposition du carbone organique du sol est appréciée par l'estimation des paramètres de décomposition selon le modèle à un compartiment de HENIN et DUPUIS (1945). Les pertes cumulées de carbone organique total (Ct) sont ajustées suivant une cinétique de premier ordre,

$$C_t = C_m (1 - e^{-kt}) \text{ où :}$$

C_t représente les pertes cumulées de carbone à l'instant t ;

C_m est la quantité maximale de carbone minéralisable ;

k est la constante de la vitesse de disparition du carbone du compartiment C_m ;

t représente le temps après mise en incubation exprimé en jours.

Nous avons utilisé un modèle de régression non linéaire du logiciel STATITCF (1989) pour l'ajustement de C_t .

CHAPITRE X

DYNAMIQUE IN SITU DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL ET DE L'AZOTE TOTAL DANS LES CONDITIONS PEDOCLIMATIQUES DE MI-PENTE ET DE BAS-FOND

1. EVOLUTION DES TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE ET AZOTE TOTAUX ET DU RAPPORT C/N

1.1. Carbone organique total

L'évolution des teneurs en carbone organique total des deux sols soumis aux traitements étudiés est représentée sur la figure X.1.

Pour le sol sableux de mi-pente (fig.X.1 a) les teneurs du témoin T_0 montrent une très faible variation (0,22 à 0,21 %). En fin d'incubation la baisse des teneurs ne représente que 4,5 % du C initial. Dans les traitements fumier (T_f) et paille de mil (T_p) par contre, on observe une diminution importante des teneurs en carbone suivant deux phases. La première phase correspondant à la première saison d'incubation (3 mois), est marquée par une rapide chute des teneurs surtout durant les 30 premiers jours. A la fin de cette phase les pertes en carbone dans T_f et T_p représentent respectivement 61 et 67 %. Pendant la seconde phase (14 mois) les teneurs en carbone continuent de diminuer mais beaucoup plus lentement. Seulement 6 et 7 % du C initial sont perdus pour T_f et T_p .

Pour le sol argilo-limoneux de bas-fond (fig.X.1 b), les teneurs en carbone du témoin et des traitements T_f et T_p suivent la même évolution que dans le sol sableux. Le témoin perd en fin d'incubation 18 % de son C initial. La baisse des teneurs de T_f et T_p pendant la première phase représente 33 et 43 % des valeurs initiales contre 16 et 20 % durant la seconde phase.

Le tableau X.1 montre que les coefficients de décomposition k sont plus élevés dans le sol sableux pour les deux types de matière organique. Dans ce sol la décomposition de paille de mil est relativement plus rapide (0,052 % jour⁻¹ contre 0,033 % jour⁻¹ pour le fumier) alors que dans celui de bas-fond la différence n'est pas significative entre les deux traitements (0,017 % jour⁻¹ en moyenne). La demi-vie ($\text{Log}2/k$) du carbone décomposé est de 13,4 et 21,4 jours respectivement pour T_p et T_f en sol sableux de mi-pente contre 36,5 et 45,5 jours dans le sol de bas-fond.

Tableau X.1 : Paramètres de la cinétique de décomposition *in situ* du carbone organique total des traitements fumier et paille de mil en fonction du type de sol.

Sol	Traitements	Coefficient détermination R^2	Carbone minéralisable (Cm) % de sol	k % jour ⁻¹	Log2/k jours
Sol sableux de mi-pente	Fumier Tf	0,90	1,049 ± 0,110	0,033 ± 0,003	21,4 ± 2,0
	Paille de mil Tp	0,83	1,010 ± 0,030	0,052 ± 0,006	13,4 ± 1,6
Sol argilo- limoneux de bas-fond	Fumier Tf	0,84	1,132 ± 0,170	0,015 ± 0,004	45,5 ± 1,1
	Paille de mil Tp	0,93	1,224 ± 0,030	0,019 ± 0,003	36,5 ± 5,1

1.2. Azote total

La figure X.2 illustre l'évolution des teneurs en azote total dans les deux sols incubés.

Dans le sol sableux (fig. X.2.a), l'azote total du témoin suit la même évolution que le carbone organique total. Les pertes en fin d'incubation représentent 9,5 % de l'azote initial. Pour les traitements fumier et paille de mil, contrairement au carbone, la diminution des teneurs en azote est plus lente et plus faible. Elle concerne à la fin de l'incubation, 29,2 % de l'azote initial de Tf contre 36,6 % pour Tp.

L'évolution de l'azote total dans le sol de bas-fond (fig. X.2.b) montre que les teneurs diminuent de 19,3 % dans le témoin, de 21 et 25 % respectivement dans Tf et Tp.

La comparaison des témoins montre que les deux sols se comportent comme dans le cas du carbone organique total avec des pertes en azote total plus élevées dans le sol de bas-fond. Pour les traitements poudrette Tf et paille de mil Tp par contre, les pertes en azote sont plus importantes dans le sol sableux.

Figure X.1 : Evolution des teneurs en carbone organique total des deux sols incubés en fonction des traitements poudrette de fumier et paille de mil et du temps d'incubation

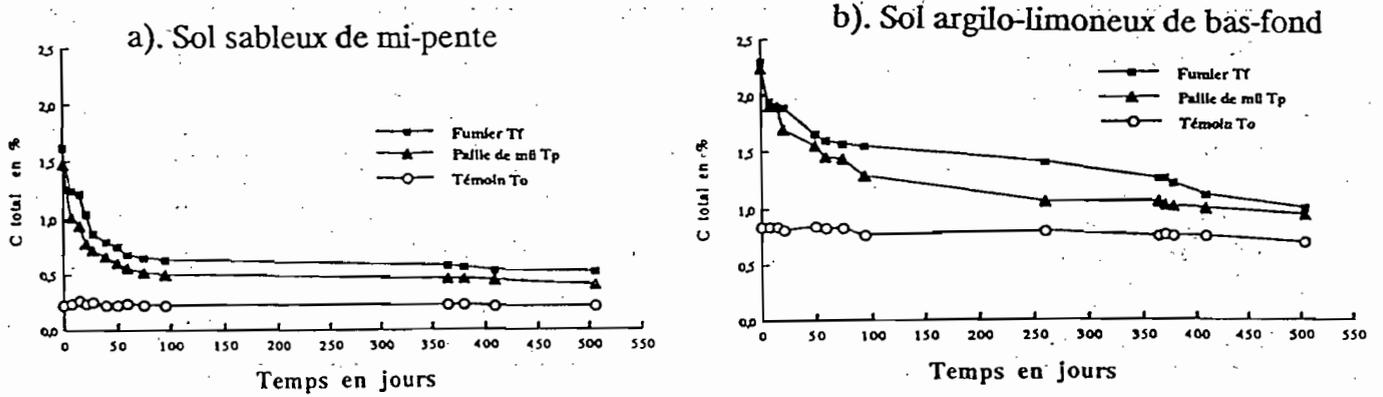


Figure X.2 : Evolution des teneurs en azote total des deux sols incubés en fonction des traitements poudrette de fumier et paille de mil et du temps d'incubation

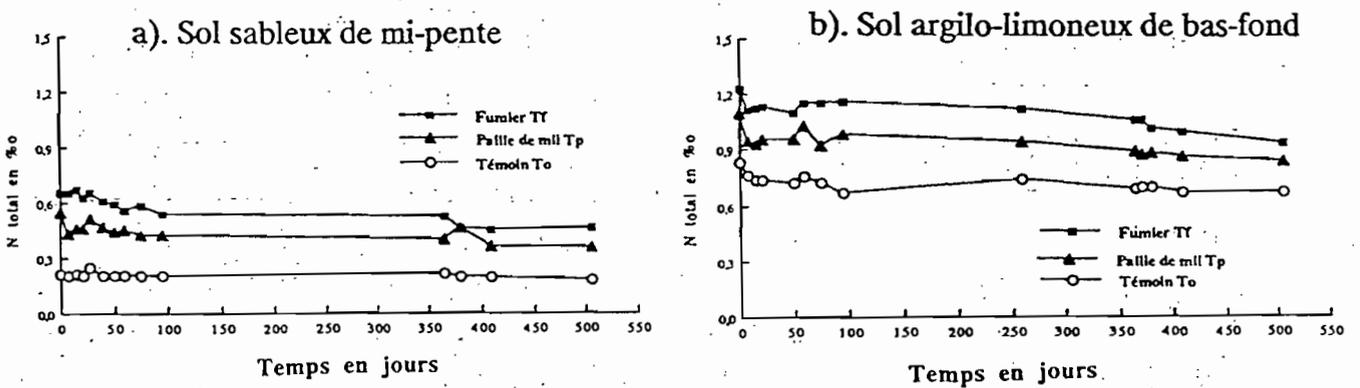
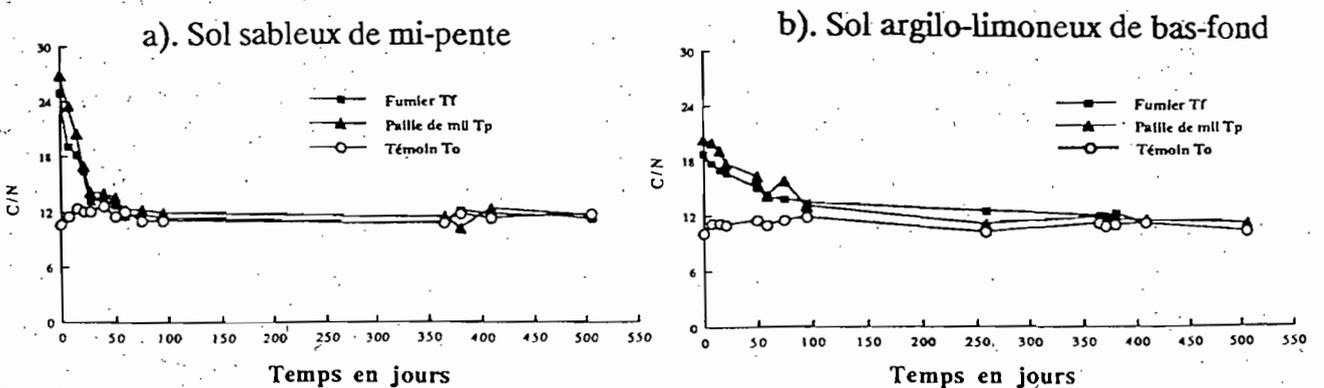


Figure X.3 : Evolution du rapport C/N des deux sols incubés en fonction des traitements poudrette de fumier et paille de mil et du temps d'incubation



1.3. Rapport C/N

La chute très rapide des teneurs en carbone organique total et celle plus lente de l'azote total se traduisent par une diminution du rapport C/N (fig.X.3) des traitements fumier et paille de mil. Celui des témoins reste à peu près constant au cours de l'incubation.

Pour le sol sableux (fig.X.3.a), le C/N diminue de moitié en moins de 40 jours pour atteindre celui du témoin (12). Il reste pratiquement à ce niveau durant le reste de l'incubation. Dans le cas du sol de bas-fond (fig.X.3.b), la diminution du C/N est plus lente mais après les trois premiers mois on n'observe plus de différence avec le témoin.

1.4. Discussion

Dans les sols témoins les pertes sont relativement plus élevées pour l'azote total (9,5 % pour le sol de mi-pente et 19,3 % pour le sol de bas-fond) que pour le carbone organique total (5 et 18 % respectivement). Cela s'expliquerait par le fait qu'il existe dans le sol des débris végétaux pauvres en azote (fraction grossière cf. chapitre IV) dont la décomposition nécessite une minéralisation de l'azote de la fraction fine.

Dans les traitements Tf et Tp par contre, les pourcentages de pertes sont plus élevés pour le carbone organique total (56,5 à 73 %) que pour l'azote total (21 à 36,6 %). Pour le carbone organique total la décomposition est très rapide car une très grande partie des pertes ont lieu pendant les 2 à 6 premières semaines (demi-vie de 13 à 45 jours) alors que la baisse de l'azote total n'est sensible qu'à partir de la deuxième saison. Ce qui entraîne la baisse rapide du rapport C/N des traitements. La dynamique du carbone et de l'azote au cours de la décomposition de la matière organique incorporée explique ces résultats. En effet, alors qu'une grande partie du carbone de la matière organique décomposée est perdue sous forme de CO₂, l'azote minéral libéré est en partie réutilisé par la microflore du sol (JENKINSON, 1977 ; LADD *et al.*, 1981 et 1985 et NICOLARDOT et CHAUSSOD, 1986).

L'évolution du carbone organique total et de l'azote total dans les témoins diffère d'un sol à l'autre. Les pertes sont plus élevées dans le sol de bas-fond (18 % pour C et 19,3 % pour N) que dans le sol de mi-pente (5 % pour C et 9,5 % pour N). Cela pourrait être lié au fait que l'activité biologique a été plus importante dans le sol de bas-fond qui est resté longtemps humide après la saison pluvieuse de 1989 alors que le sol de mi-pente s'est vite desséché. Les teneurs en matière organique, relativement plus élevées dans le sol de bas-fond, pourraient aussi expliquer cette différence.

Cependant concernant les traitements Tf et Tp, la décomposition du carbone organique et de l'azote totaux est plus élevée dans le sol sableux de mi-pente (68,5 et 73

% pour C et 29,2 et 36,6 % pour N) que dans le sol argilo-limoneux de bas-fond (56,5 et 58,3 % pour C et 21 et 25 % pour N). La demi-vie du carbone organique décomposé est plus élevée dans le sol de bas-fond (41 jours en moyenne) que dans le sol de mi-pente (18 jours en moyenne). Les teneurs en argile plus élevées dans le sol de bas-fond (33 %) peuvent protéger davantage la matière organique contre la biodégradation par rapport au sol de mi-pente contenant environ 10 % d'argile. Des résultats similaires ont été obtenus en milieu tropical (GODEFROY, 1974 ; JENKINSON et AYANABA, 1977 ; DUIVENBOODEN et CISSE, 1989, LADD *et al.*, 1986b) et tempéré (JENKINSON, 1975 ; SORENSEN, 1980 ; JAMES *et al.*, 1986 CHRISTENSEN, 1986a). Mais la différence entre les deux sols peut aussi s'expliquer par une mauvaise décomposition due aux conditions hydriques particulières de 1989 marquées par un engorgement temporaire du site de bas-fond (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; REDDY et PATRICK, 1974).

Les résultats montrent que l'évolution des teneurs en carbone organique et azote totaux est fonction de la nature de la matière organique incorporée. En effet, quel que soit le sol, la décomposition du carbone organique et de l'azote totaux de paille de mil broyée est plus importante et rapide que celle de la poudrette de fumier. Le coefficient K de perte en carbone organique total dans T_p est de 0,052 et 0,019 %·jour⁻¹ respectivement pour le sol de mi-pente et le sol de bas-fond alors que dans T_f il est, dans le même ordre, de 0,033 et 0,015 %·jour⁻¹. Cela peut être lié au broyage qui rend la cellulose dont les pailles en sont riches, plus accessible aux microorganismes décomposeurs.

On retiendra de cette étude quantitative, que la décomposition de matière organique incorporée est très importante et rapide dans les deux cas avec des pertes en carbone organique plus élevées que celles en azote total. Mais, il serait intéressant de connaître l'évolution de la matière organique incorporée dans les différentes fractions des deux sols.

2. EVOLUTION DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL ET DE L'AZOTE TOTAL DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS DU SOL

Le fractionnement concerne les échantillons prélevés 8 jours après mise en incubation (8 JAI) et 505 JAI (fin d'incubation). Le choix de la date de 8 JAI comme situation initiale, permet de prendre en compte un éventuel entrainement mécanique des particules organiques fines qui ne serait pas l'oeuvre d'une décomposition in situ.

2.1. Carbone organique total

La figure X.4 illustre, pour les deux sols les variations des contenus en carbone organique total (en mg/g de sol) des fractions pour chaque traitement. Les données détaillées sont en ANNEXE X.1.

2.1.1. Sol sableux de mi-pente (fig. X.4.a)

En début d'incubation (8 JAI), les contenus en carbone des fractions du sol témoin augmentent de la fraction grossière à la fraction fine (0,36 à 1,59 mg/g de sol). Plus de 68 % du carbone organique total du sol se trouve ainsi concentré dans la fraction fine. Pour le traitement fumier Tf les contenus en carbone organique total sont plus élevés dans la fraction 2000-200 μm (7,97 mg/g de sol) alors que ceux de la fraction 200-50 μm sont plus faibles (1,92 mg/g de sol). La fraction fine occupe une position intermédiaire avec 2,34 mg/g de sol. La répartition du carbone dans le traitement paille de mil est semblable à celle de Tf avec des valeurs plus faibles. Elles sont de 1,37, 2,29 et 5,84 mg/g de sol respectivement pour 200-50, <50 et 2000-200 μm . Par rapport au témoin, l'apport de la matière organique (poudrette de fumier et paille de mil broyée à 2 mm) augmente les contenus en carbone organique total de toutes les fractions mais surtout ceux de la fraction grossière qui représentent 65 à 62 % du carbone organique total de ces traitements.

En fin d'incubation (505 JAI), la répartition du carbone organique total du témoin To est similaire à celle observée à 8 JAI ; les contenus en carbone organique total varient entre 0,10 mg/g de sol pour la fraction 2000-200 μm à 1,53 mg/g de sol pour la fraction <50 μm . Concernant les traitements poudrette de fumier et paille de mil, les contenus en carbone organique total sont également plus élevés dans la fraction fine (2,42 et 2,09 mg/g de sol respectivement pour Tf) et plus faibles dans la fraction grossière (0,85 et 0,49 mg/g de sol pour Tf et Tp).

L'évolution du carbone organique total des fractions granulométriques du sol sableux entre 8 et 505 JAI (tableau X.1), montre une baisse quasi générale des contenus des différentes fractions. L'importance de cette diminution décroît fortement de la fraction 2000-200 μm à la fraction fine <50 μm quel que soit le traitement. Les pertes en carbone organique total de la fraction 2000-200 μm représentent 72, 89 et 92 % respectivement pour To, Tf et Tp. Celles de la fraction 200-50 μm sont, dans le même ordre, de 26, 16 et 29 %. La baisse des contenus de la fraction fine concerne seulement

le témoin To (4 %) et le traitement paille (9 %). Dans le traitement fumier par contre, la fraction fine a été légèrement enrichie en carbone organique total (0,02 mg/g de sol).

2.1.2. Sol argilo-limoneux de bas-fond (fig. X.4.b)

En début d'incubation (8 JAI), les contenus en carbone organique total du sol témoin To de bas-fond, augmentent de la fraction grossière à la fraction fine (0,66 à 6,44 mg/g de sol). Environ 80 % du carbone organique total se trouve donc dans la fraction argilo-limoneuse. Dans le traitement poudrette de fumier Tf le contenu en carbone organique total de la fraction fine est légèrement plus élevé que celui de la fraction 2000-200 μm (8,03 contre 7,58 mg/g de sol) ; il est de 3,86 mg/g de sol pour la fraction 200-50 μm . Par contre, pour le traitement paille de mil Tp, la fraction grossière contient plus de carbone organique total (10,02 mg/g de sol) que la fraction fine (7,12 mg/g de sol) ; la fraction 200-50 μm possède le plus faible contenu (2,26 mg/g de sol). Comme dans le sol sableux, l'augmentation des contenus en carbone organique total, due à l'apport de matière organique (fumier et paille de mil), concerne toutes les fractions. Mais elle est nettement plus élevée pour la fraction 2000-200 μm dont le carbone représente 39 et 52 % du C total respectivement pour Tf et Tp.

En fin d'incubation (505 JAI), le carbone organique total du témoin To se répartit de la même manière qu'à 8 JAI avec des contenus variant entre 0,29 et 5,63 mg/g de sol. Le carbone organique total de la fraction fine représente 81 % du C total. Dans le traitement poudrette de fumier Tf les contenus en carbone organique total des différentes fractions montrent le même classement que pour le témoin avec des valeurs variant entre 0,74 à 6,56 mg/g de sol. Les contenus en carbone organique total dans le traitement paille de mil Tp, comme To et Tf, augmentent de la fraction grossière à la fraction fine (0,67 à 6,45 mg/g de sol).

L'examen du tableau X.2 montre une diminution des contenus en carbone organique total qui concerne toutes les fractions quel que soit le traitement. Mais comme pour le sol sableux, l'importance des pertes en carbone diminue avec la taille des fractions. Pour la fraction 2000-200 μm les pertes sont de 56, 90 et 93 % respectivement pour To, Tf et Tp. Celles de la fraction 200-50 μm représentent, dans le même ordre, 10, 42 et 24 %. Quant à la fraction <50 μm , les pertes respectives des traitements To, Tf et Tp sont de 13, 18 et 10 %.

Tableau X.2 : Variation des teneurs et contenus en carbone organique total des fractions granulométriques des traitements entre 8 et 505 jours après mise en incubation.

Sol sableux de mi-pente				
Traitements	Fractions taille en μm	ΔC mg/g de fraction	ΔC mg/g de sol	ΔC % C initial
Témoïn	2000-200	- 0,79	- 0,26	- 72,2
	200-50	- 0,45	- 0,10	- 26,3
	< 50	- 1,0	- 0,06	- 3,8
Fumier	2000-200	- 22,4	- 7,12	- 89,0
	200-50	- 1,0	- 0,3	- 15,6
	< 50	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,9
Paille de mil	2000-200	- 15,4	- 5,27	- 90,2
	200-50	- 0,13	- 0,29	- 21,2
	< 50	- 1,63	- 0,09	- 3,9

Sol argilo-limoneux de bas-fond				
Traitements	Fractions taille en μm	ΔC mg/g de fraction	ΔC mg/g de sol	ΔC % C initial
Témoïn	2000-200	- 58,6	- 0,37	- 56,1
	200-50	- 0,15	- 0,09	- 9,7
	< 50	- 0,7	- 0,81	- 12,6
Fumier	2000-200	- 207,4	- 6,84	- 90,2
	200-50	- 7,4	- 1,6	- 41,5
	< 50	- 1,8	- 1,47	- 18,3
Paille de mil	2000-200	- 241,7	- 9,35	- 93,3
	200-50	- 2,4	- 0,54	- 23,9
	< 50	- 0,9	- 0,67	- 9,4

Figure X.4 : Contenus en carbone organique total (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol sableux de mi-pente à 8 et 505 jours après incubation (JAI)

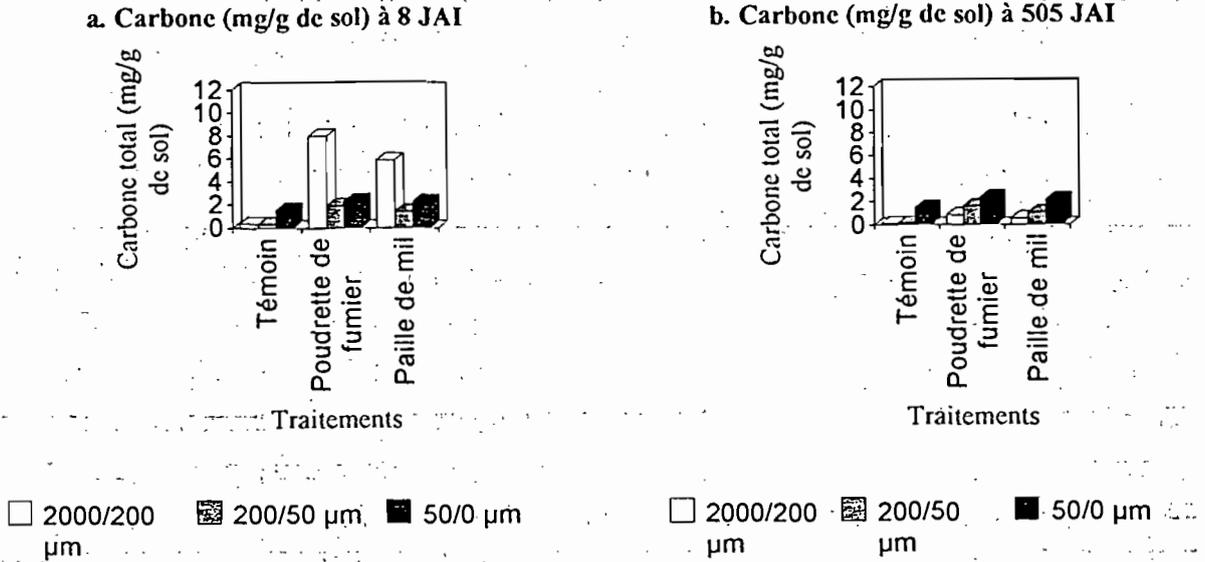
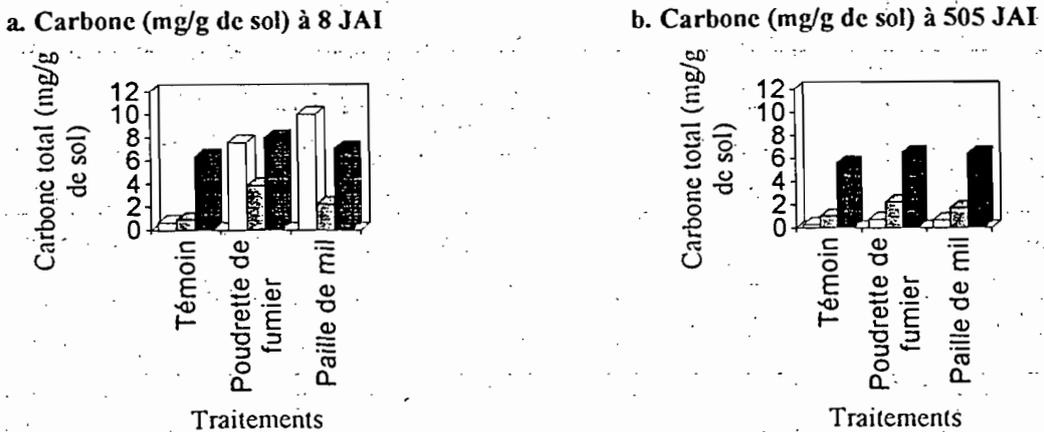


Figure X.5 : Contenus en carbone (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol argilo-limoneux de bas-fond à 8 et 505 jours après incubation (JAI)



2.2. Azote total et le rapport C/N

Pour les deux sols, les variations des contenus en azote total sont illustrées dans la figure X.5. Les valeurs détaillées sont regroupées en ANNEXE X.2.

2.2.1. Sol sableux de mi-pente (fig. X.5.a)

En début d'incubation (8 JAI), la répartition de l'azote total du témoin dans les deux fractions granulométriques (2000-50 et <50 μm) est comparable à celle du carbone organique total. Près de 75 % du N total (0,15 mg/g de sol) se trouvent dans la fraction <50 μm . Dans le traitement poudrette de fumier Tf la fraction 2000-50 μm contient 0,47 mg/g de sol représentant 73 % de l'azote total contre 0,17 mg/g de sol pour la fraction fine. Pour le traitement paille de mil Tp la fraction 2000-50 μm dose 0,26 mg/g de sol (61 % de N total) contre 0,17 mg/g de sol pour la fraction fine. Par rapport au témoin, l'apport de fumier et de paille de mil augmente respectivement de 8 et 4 fois le contenu en azote total de la fraction 2000-50 μm . Celui de la fraction fine ne subit par contre qu'une très légère augmentation dans les deux traitements. Le rapport C/N des fractions du sol témoin varie entre 11 et 12,5. L'apport de la matière organique augmente surtout le rapport C/N de la fraction 2000-50 μm qui passe à 22 pour Tf et 26 pour Tp). Le rapport C/N de fraction fine est de 13,5 en moyenne dans les deux traitements.

En fin d'incubation (505 JAI), le contenu en azote total des fractions du témoin To augmente de la fraction grossière (0,05 mg/g de sol) à la fraction fine (0,10 mg/g de sol) où il représente 66 % du N total. La même tendance est observée pour le traitement fumier Tf avec 0,18 mg/g de sol pour la fraction 2000-50 μm et 0,28 mg/g de sol pour la fraction fine (61 % de N total). Comme To et Tf, le contenu en azote des fractions du traitement paille de mil Tp est plus faible pour la fraction 2000-50 μm (0,08 mg/g de sol) et plus élevé pour la fraction fine (0,27 mg/g de sol) où il constitue 77 % du N total. Pour les traitements fumier et paille de mil, les valeurs du rapport C/N sont plus élevées pour 2000-50 μm avec une différence entre Tf et Tp (13 contre 20). Le rapport C/N de la fraction <50 μm est relativement bas dans les deux cas (8 et 9). Par contre celui de la fraction fine du témoin est de 15.

Entre 8 JAI et 505 JAI (tableau X.3), la dynamique in situ de l'azote total dans les fractions du sol sableux montre deux tendances en fonction de la présence ou non d'apport organique. Dans le témoin, sans apport organique, on observe une diminution des contenus en azote total de toutes les fractions. Cette baisse concerne 33 % de l'azote total de la fraction <50 μm et seulement 16 % pour 2000-50 μm . Dans les traitements

avec matière organique (fumier et paille de mil), la diminution porte uniquement sur la fraction grossière où elle représente 62 % Tf et 69 % pour Tp. La fraction $< 50 \mu\text{m}$ connaît, par contre, une augmentation de son stock de 66 et 69 % respectivement pour Tf et Tp.

2.2.2. Sol argilo-limoneux de bas-fond (fig. X.5.b)

En début d'incubation (8 JAI), la fraction 2000-50 μm du sol témoin ne contient que 0,03 mg/g de sol contre 0,74 mg/g de sol pour la fraction fine. Dans le traitement fumier le contenu en azote total augmente de la fraction 2000-50 μm à la fraction fine (0,40 à 0,71 mg/g de sol). Pour le traitement paille de mil, on observe la même tendance que précédemment. Les valeurs augmentent de 0,34 à 0,62 mg/g de sol. L'apport de la matière organique augmente surtout le stock d'azote total de la fraction 2000-50 μm de 13 (Tf) à 11 (Tp) fois par rapport au témoin. Le contenu en azote total reste cependant inférieur à celui de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ qui représente 64 et 60 % respectivement pour Tf et Tp. Le rapport C/N diminue avec la taille des fractions quel que soit le traitement. Celui de la fraction 2000-50 μm est très élevé pour le témoin (54) mais plus faible pour Tf et Tp, respectivement de 28 et 36. La fraction $< 50 \mu\text{m}$ a par contre, un rapport C/N qui varie peu selon les traitements (9 à 10).

En fin d'incubation, dans tous les traitements les contenus en azote total augmentent de la fraction 2000-50 μm à la fraction $< 50 \mu\text{m}$. Les valeurs, en mg/g de sol, vont de 0,02 à 0,65 pour le témoin, de 0,20 à 0,76 pour le traitement fumier et de 0,12 à 0,71 pour le traitement paille de mil. L'azote total de la fraction fine représente respectivement 97, 79 et 86 % du N total. Le rapport C/N de fraction grossière du témoin (65) est plus élevé que celui des traitements fumier et paille de mil (15 et 20 respectivement). Celui de la fraction fine est bas et presque identique dans les trois cas (9).

Entre 8 JAI et 505 JAI (tableau X.3), la variation de l'azote total des fractions du sol argilo-limoneux de bas-fond suit la même tendance pour les traitements fumier et paille de mil : les pertes d'azote des fractions 2000/50 μm représentent 53 et 64 % respectivement pour le fumier et la paille de mil tandis que l'accroissement des contenus de la fraction fine est de 11 et 16 %. Dans le témoin, la chute des contenus en azote total concerne les deux fractions mais, contrairement au témoin sableux, elle plus importante pour la fraction grossière (42 %) que la fraction fine (7 %).

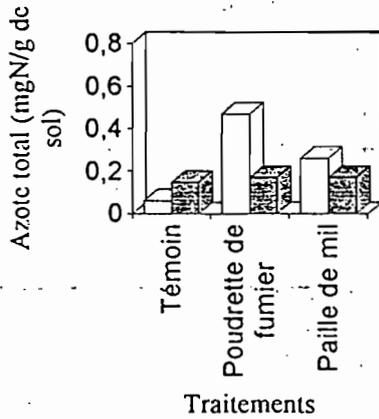
Tableau X.3 : Variation des contenus en azote total des fractions granulométriques des traitements entre 8 et 505 jours après mise en incubation

Sol sableux de mi-pente				
Traitements	Fractions taille en μm	ΔN mg/g de fraction	ΔN mg/g de sol	ΔN % N initial
Témoin	2000-50	- 0,01	0,01	- 16,7
	< 50	- 0,37	- 0,05	- 33,3
Fumier	2000-50	- 0,33	- 0,29	- 61,7
	< 50	+ 0,80	+ 0,11	+ 65,7
Paille de mil	2000-50	- 0,21	- 0,18	- 69,2
	< 50	+ 0,70	+ 0,10	+ 58,8

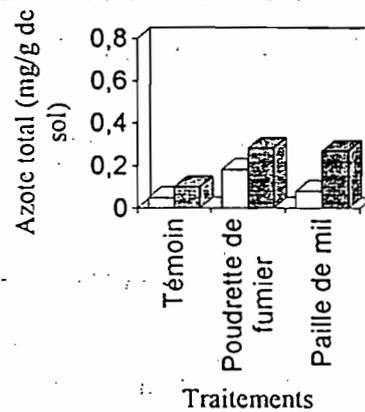
Sol argilo-limoneux de bas-fond				
Traitements	Fractions taille en μm	ΔN mg/g de fraction	ΔN mg/g de sol	ΔN % N initial
Témoin	2000-50	- 0,05	- 0,01	-33,3
	< 50	- 0,07	- 0,09	-12,2
Fumier	2000-50	- 0,76	- 0,20	-50,0
	< 50	+ 0,11	+ 0,05	+ 7,0
Paille de mil	2000-50	- 0,73	- 0,12	-35,0
	< 50	+ 0,15	+ 0,09	+ 14,5

Figure X.6 : Contenus en azote total (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol sableux de mi-pente à 8 et 505 jours après incubation (JAI)

a. Azote total (mg/g de sol) à 8 JAI



b. Azote total (mg/g de sol) à 505 JAI

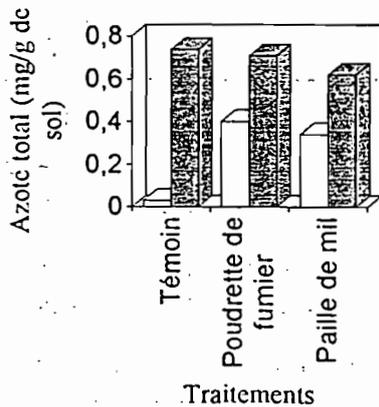


□ 2000/50 µm ▨ 50/0 µm

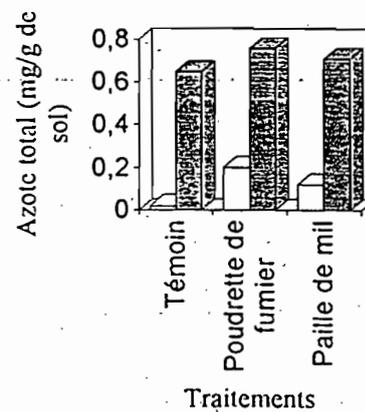
□ 2000/50 µm ▨ 50/0 µm

Figure X.7 : Contenus en azote total (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol argilo-limoneux à 8 et 505 jours après incubation (JAI)

a. Azote total (mg/g de sol) à 8 JAI



b. Azote total (mg/g de sol) à 505 JAI



2.3. Discussion

Pour le carbone organique total, les résultats montrent que, quels que soient le sol et le traitement, l'importance de la décomposition décroît dans l'ordre suivant $2000-200 \mu\text{m} > 200-50 \mu\text{m} > < 50 \mu\text{m}$. Des résultats similaires ont été trouvés en milieu tropical (FELLER *et al.*, 1981 et 1985) et tempéré (CHRISTENSEN et SORENSEN, 1985). Plusieurs raisons peuvent expliquer ce comportement. Les fractions $2000-200 \mu\text{m}$ et $200-50 \mu\text{m}$ comportent des débris végétaux à C/N relativement élevé (21 à 36) constituant une source énergétique pour la microflore hétérotrophe. Ce qui accroît l'activité biologique conduisant d'une part à une dégradation plus ou moins rapide du carbone organique et d'autre part à une augmentation de la biomasse microbienne qui, finalement, augmente le contenu en carbone organique total de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ (JAMES *et al.*, 1986). LADD *et al.* (1980) ont trouvé 14 % du carbone marqué incorporé au sol dans la biomasse microbienne. De plus, dans les fractions grossières, l'absence de liaison solide entre la fraction minérale et la matière organique rend cette dernière plus accessible à la biodégradation par rapport à celle de la fraction fine. Enfin il y aurait un enrichissement relatif des fractions fines par les produits de décomposition des fractions plus grossières.

Cependant la décomposition du carbone organique de la fraction grossière $2000-200 \mu\text{m}$ montre des différences entre les traitements. Le témoin présente dans les deux cas les plus faibles valeurs (56 et 72 %). Celles du traitement fumier sont plus élevées (89 et 90 %) mais restent légèrement inférieures à celles du traitement paille de mil (92 et 93 %). Ceci s'explique par l'effet de la stimulation de l'activité biologique dû aux apports organiques (CHABELIER, 1973 et DOMMERGUES et MANGENOT, 1970).

Concernant l'azote total, les résultats montrent une diminution des contenus de la fraction grossière et une augmentation de ceux de la fraction argilo-limoneuse dans les traitements avec fumier ou paille de mil. Par contre, en absence d'apport organique, les pertes d'azote total concernent aussi la fraction argilo-limoneuse et apparaissent même plus importantes que celles de la fraction grossière. CHRISTENSEN et SORENSEN (1986), FELLER *et al.* (1980 et 1983) et LADD *et al.* (1980) ont fait les mêmes observations. Les processus d'enrichissement de la fraction fine peuvent être de nature physico-chimique (fixation de NH_4^+ sur les particules argileuses) ou de nature biologique par réorganisation de l'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) par la microflore du sol (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; SORENSEN, 1980 et KAWAGUCHI *et al.*, 1986). Dans ces sols à faible capacité d'échange, la voie biologique semble la plus importante.

En conclusion on retiendra les faits ci-après.

La dynamique *in situ* du carbone organique total et de l'azote total des fractions granulométriques est comparable dans les deux sols étudiés.

La décomposition du carbone, en présence ou non d'apports organiques, est importante dans la fraction 2000-200 μm (56 à 93 %) et relativement faible dans la fraction <50 μm (4 et 18 %)

Concernant l'azote total, en présence d'apports organiques, les contenus en azote total de la fraction 2000-50 μm diminue fortement (53 et 69 %) alors que ceux de la fraction <50 μm augmentent de 0,05 à 0,10 mg/g de sol. Ce qui révèle un transfert d'azote de la fraction grossière vers la fraction fine.

3. EFFET DES APPORTS ORGANIQUES SUR L'ENRICHISSEMENT EN CARBONE ORGANIQUE ET AZOTE TOTAUX DU SOL.

Après 18 mois d'incubation *in situ*, la matière organique des traitements poudrette de fumier et paille de mil s'est plus ou moins stabilisée à un rapport C/N comparable à celui des témoins. On peut alors apprécier l'effet des apports organiques en comparant les teneurs en carbone organique et azote totaux des traitements poudrette de fumier (Tf) et paille de mil (Tp) à celles du témoin (To). La comparaison statistique (tableau X.4) montre le classement suivant au seuil de 5 % : Tf > Tp > To. L'apport de poudrette de fumier et de la paille de mil a contribué à une augmentation du stock organique des deux sols étudiés.

Pour le sol sableux, les gains du traitement fumier sont de 3 mg de carbone par gramme de sol et 0,28 mg d'azote par gramme de sol représentant respectivement 22,2 et 55 % du carbone et de l'azote apportés. Ceux du traitement paille de mil sont 1,9 et 0,18 mg/g de sol respectivement pour le carbone organique total et l'azote total, soit 14,5 et 43 % des apports.

Dans le sol argilo-limoneux de bas-fond, le traitement fumier apporte 3,1 mg de carbone par gramme de sol et 0,30 mg d'azote par gramme de sol représentant respectivement 23 et 59 % des apports. Les gains du traitement paille de mil, en mg/g de sol, sont de 2,4 pour le carbone organique total et de 0,16 pour l'azote total, soit 18,4 et 38 % des apports.

Pour un traitement donné, les pourcentages de gains en carbone organique et en azote totaux sont comparables dans les deux sols étudiés. Ceci semble révéler que, durant deux saisons de pluies séparées par une saison sèche, l'effet de la texture sur la décomposition de la matière organique incorporée est faible.

Le tableau X.5 donne la répartition des gains en carbone organique et azote totaux en fonction des fractions granulométriques. Plus de la moitié des gains en carbone (65 à 71 % pour le sol sableux et 57 à 67 % pour le sol de bas-fond) se trouvent dans la fraction 2000-50 μm . Pour l'azote total par contre, 58 à 80 % des gains se trouvent dans la fraction $< 50 \mu\text{m}$ du sol sableux alors que dans le sol argilo-limoneux de bas-fond cette fraction n'en contient que 38 % en moyenne. Ces résultats corroborent ceux observés dans le chapitre IV concernant l'accumulation du carbone organique total et de l'azote total dans les différentes fractions du sol.

Tableau X.4 : Comparaison des teneurs en carbone organique et azote totaux des traitements pour chaque sol.

Traitement	Sol sableux de mi-pente		Sol argilo-limoneux de bas-fond	
	Carbone % de sol	Azote ‰ de sol	Carbone % de sol	Azote ‰ de sol
Témoin	0,21 ^a	0,18 ^a	0,69 ^a	0,67 ^a
Fumier	0,51 ^b	0,46 ^b	1,00 ^b	0,97 ^b
Paille de mil	0,40 ^c	0,36 ^c	0,93 ^c	0,83 ^c
Coefficient de variation CV (en %)	8,4	6,4	3,5	4,5

Les valeurs portant une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % selon le test de NEWMAN-KEULS.

Tableau X.5 : Gain en carbone organique total (mg/g de sol) et azote total (mg/g de sol) des traitements fumier et paille de mil par rapport au témoin en fin d'incubation (505 JAI).

Traitements	Fractions taille en μm	C total mg/g sol		N total mg/g sol	
		Sol de mi-pente	Sol de bas-fond	Sol de mi-pente	Sol de bas-fond
Fumier	2000-200	0,75	0,45	0,13	0,18
	200-50	1,46	1,24		
	<50	0,89	0,93	0,18	0,11
Paille de mil	2000-200	0,47	0,38	0	0,11
	200-50	0,92	0,70		
	<50	0,67	0,82	0,17	0,06

L'ensemble de ces résultats obtenus sur 505 jours montre que l'augmentation des teneurs en carbone organique et azote totaux est du même ordre de grandeur dans les deux sols pour un traitement donné. Cela confirme la possibilité d'amélioration du statut organique des sols par les apports organiques (PICHOT, 1975). Il faut cependant nuancer ces résultats car la nature et le mode d'apport des amendements organiques influencent les teneurs en carbone organique et azote totaux du sol. PICHOT *et al.* (1974), GANRY *et al.* (1979) et SEDOGO (1981), montrent, pour une même dose, le classement suivant : fumier > compost > résidus de récolte. Des expérimentations de longue durée montrent que seules des doses relativement fortes ou répétées et associées à une fumure minérale azotée permettent une augmentation du stock organique et azoté du sol (PICHOT *et al.*, 1981).

4. CONCLUSION

Les sols témoin sans apport de matière organique montrent une variation très faible (sol sableux) à faible (sol argilo-limoneux de bas-fond) de leurs teneurs en carbone organique et azote totaux.

La décomposition du carbone organique apporté par la poudrette de fumier ou la paille de mil est assez rapide dans le bas-fond et très rapide en mi-pente. Après une saison de pluies (4 mois) d'incubation, plus de 50 % du carbone incorporé est décomposé dans le sol sableux contre 33 à 43 % pour le sol de bas-fond. A la saison pluvieuse suivante et en l'absence d'un nouvel apport organique, la décomposition se poursuit mais plus lentement. Elle est beaucoup plus lente dans le sol sableux où plus de

la moitié de la matière organique incorporée a été décomposée au cours de la première saison.

Dans les deux sols, la diminution des teneurs en carbone organique total est relativement plus importante dans le traitement paille de mil broyée que dans le traitement poudrette de fumier (73 contre 68 % dans le sol sableux et 58 contre 56 % pour le sol argilo-limoneux).

Les variations des teneurs en azote sont, au contraire, plus faibles. La diminution des teneurs représente 29,2 à 36 % des valeurs initiales pour le sol sableux et 21 à 25 % pour le sol de bas-fond. Pour chaque sol, les pertes en azote total sont sensiblement plus élevées dans le sol avec paille de mil que dans le sol avec poudrette de fumier.

La dynamique du carbone et de l'azote total dans les traitements fumier et paille de mil conduit assez rapidement, à un certain équilibre des teneurs en ces deux éléments, caractérisé par un rapport C/N bas, voisin de celui des sols témoin (10). Cette rapide décomposition de la matière organique incorporée s'explique par la variation des conditions pédoclimatiques (humidité et température) au cours de l'année. En effet, la succession de la saison sèche (7 à 8 mois) et de la saison pluvieuse (avec des périodes humides à très humides) est très favorable à l'activité biologique dans les sols (GREENLAND, 1958 ; JENKINSON et AYANABA, 1977).

L'augmentation des teneurs en carbone et azote total due à la poudrette de fumier est sensiblement plus élevée que celle due à la paille de mil. Mais pour les deux traitements, cette augmentation est du même ordre de grandeur dans les deux sols. Les gains relatifs d'azote total sont plus élevés (55 à 59 % pour Tf et 38 à 43 % pour Tp) que ceux du carbone organique total (22 à 23 % pour Tf et 14,5 à 18,5 % pour Tp).

La variation des contenus en carbone organique total des fractions, entre le début et la fin de l'incubation, montre que, quels que soient le sol et le traitement, la décomposition du carbone suit l'ordre suivant : 2000-200 μm > 200-50 μm > <50 μm . Par rapport au sol témoin, l'apport de matière organique enrichit les contenus en carbone organique total de toutes les fractions et surtout des fractions 200-50 et <50 μm .

Pour l'azote total, la diminution des teneurs concerne toutes les fractions dans les sols témoin. Par contre, en présence d'apport organique il y a une importante diminution des teneurs de la fraction 2000-50 μm et une augmentation de celles de la fraction <50 μm . Cela s'explique par les processus de minéralisation-réorganisation biologiques qui conduisent à un transfert d'azote de la fraction organique grossière vers la fraction fine.

Ces résultats montrent que l'apport de la poudrette de fumier à dose forte, telle qu'elle est appliquée dans le mode de fumure localisée, augmente très localement

les stocks de carbone organique total et d'azote total du sol. Mais l'accumulation d'azote dans la fraction fine révèle une réorganisation de l'azote minéral libéré au cours de la décomposition de la matière organique incorporée. Ceci pourrait affecter la quantité d'azote minéral dans le sol au cours du cycle cultural. Dans le chapitre XI, on essayera d'apprécier, dans les mêmes conditions pédoclimatiques, l'effet des apports organiques sur la dynamique de l'azote minéral.

CHAPITRE XI

EFFET DES APPORTS ORGANIQUES SUR L'EVOLUTION DE L'AZOTE MINERAL DANS LES CONDITIONS PEDOCLIMATIQUES DE MI-PENTE ET DE BAS-FOND

L'objet de ce chapitre est d'analyser les effets d'un apport de poudrette de fumier et de paille de mil sur la dynamique de l'azote minéral dans deux conditions pédoclimatiques caractérisées, l'une par un sol sableux en mi-pente bien drainé, l'autre par un sol argilo-limoneux de bas-fond mal drainé. Il s'agit du dispositif expérimental précédent décrit dans le chapitre IX. Nous présenterons puis discuterons les résultats obtenus pendant les deux saisons pluvieuses qu'a duré l'expérimentation.

1. EVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE MINERAL AU COURS DE LA PREMIERE SAISON PLUVIEUSE D'INCUBATION (1989)

1.1. Résultats

Dans chaque condition pédoclimatique, l'essai a été conduit avec 4 répétitions des traitements comparés (To, Tf et Tp). L'analyse statistique des résultats, présentée en ANNEXE XI.1, montre des coefficients de variation compris entre 2 et 36 %.

1.1.1. Sol de mi-pente

Les résultats sont représentés sur la figure XI.1.

Quel que soit le traitement, on observe la présence des deux formes d'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-) tout au long de la saison avec une prédominance de l'azote nitrique dont les valeurs varient de 1,5 à 6,8 mg/kg de sol dans le témoin To, de 4,7 à 12,6 mg/kg de sol pour le traitement poudrette de fumier Tf et de 1,9 à 8,1 pour le traitement paille de mil Tp. Les teneurs en azote NH_4^+ vont de 0,6 à 1,4 mg/kg de sol pour To, de 2,2 à 5,0 mg/kg de sol pour Tf et de 1,6 à 3,1 mg/kg de sol pour Tp.

La variation des teneurs au cours du temps montre deux phases.

La première phase correspond aux 30 premiers jours après la mise incubation (JAI). Elle est marquée par une augmentation des teneurs en azote NO_3^- dans tous les

traitements à 14 JAI suivie par une baisse une semaine après (21 JAI). La variation de l'azote NH_4^+ est très faible mais montre cependant une tendance opposée à celle des nitrates. Le niveau d'azote minéral est significativement (seuil de 5 %) plus élevé dans Tf par rapport à To et To dont les teneurs sont comparables.

La seconde phase est comprise entre 30 et 95 JAI. Elle est caractérisée, pour To et Tf, par une très faible variation des teneurs en azote minéral avec cependant une tendance à la hausse. Les teneurs en NO_3^- de Tp suivent une variation similaire jusqu'à 60 JAI avant de connaître une augmentation à 80 JAI suivie par une chute à 95 JAI. Au cours de cette phase, seul Tf présente les teneurs significativement plus élevées par rapport au témoin sauf à 80 et 95 JAI où la différence entre Tp et To devient significative.

1.1.2. Sol de bas-fond

Les variations d'azote minéral sont illustrées par la figure XI.2.

Pour ce sol également, les résultats montrent la présence des deux formes d'azote minéral au cours de la saison quel que soit le traitement. L'importance de l'une ou de l'autre forme est variable selon la date de prélèvement. D'une façon générale, les teneurs en NO_3^- varient de 4,5 à 10,5 mg/kg de sol pour le témoin To, de 3,3 à 9,7 mg/kg de sol pour traitement poudrette de fumier Tf et de 3,3 à 11,1 mg/kg de sol pour le traitement paille de mil Tp. Quant à l'azote NH_4^+ , les teneurs vont de 0,9 à 9,5 mg/kg de sol pour To, de 3,4 à 17,8 mg/kg de sol pour Tf et de 3,0 à 17,5 mg/kg de sol pour Tp.

La variation des teneurs au cours de la saison montre trois phases.

La première phase correspond aux 30 premiers JAI. Au cours de cette phase, les teneurs en azote NH_4^+ diminuent significativement dans tous les traitements mais surtout dans Tf. Les teneurs en NO_3^- de Tf et Tp accusent également une baisse qui est cependant plus faible que pour NH_4^+ . Le témoin To par contre, présente des teneurs qui augmentent progressivement jusqu'à 21 JAI avant de chuter en dessous de celles de Tf et Tp ; à 21 JAI, les teneurs en azote minéral de To sont supérieures à celles de Tf et Tp au seuil de 5 %.

Figure XI.1 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de mi-pente incubé *in situ* (1ère saison)

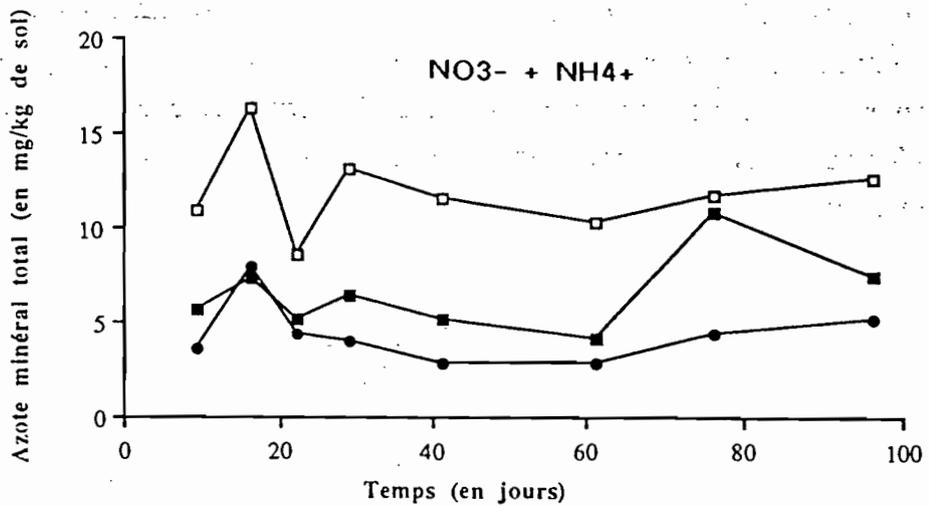
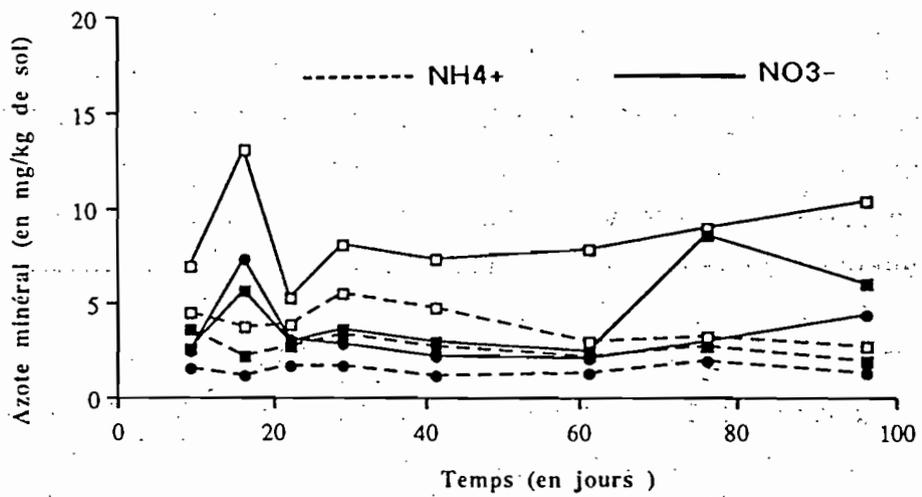
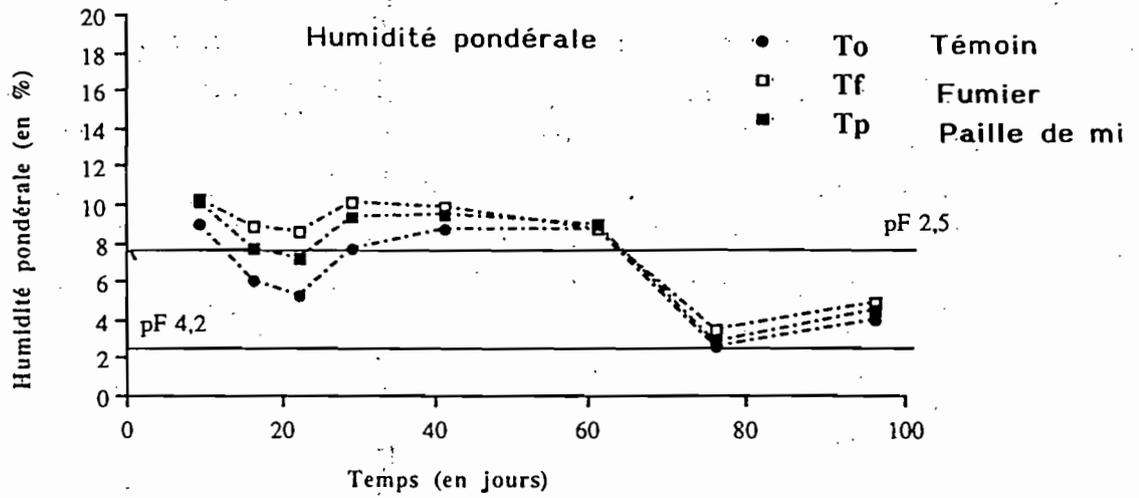
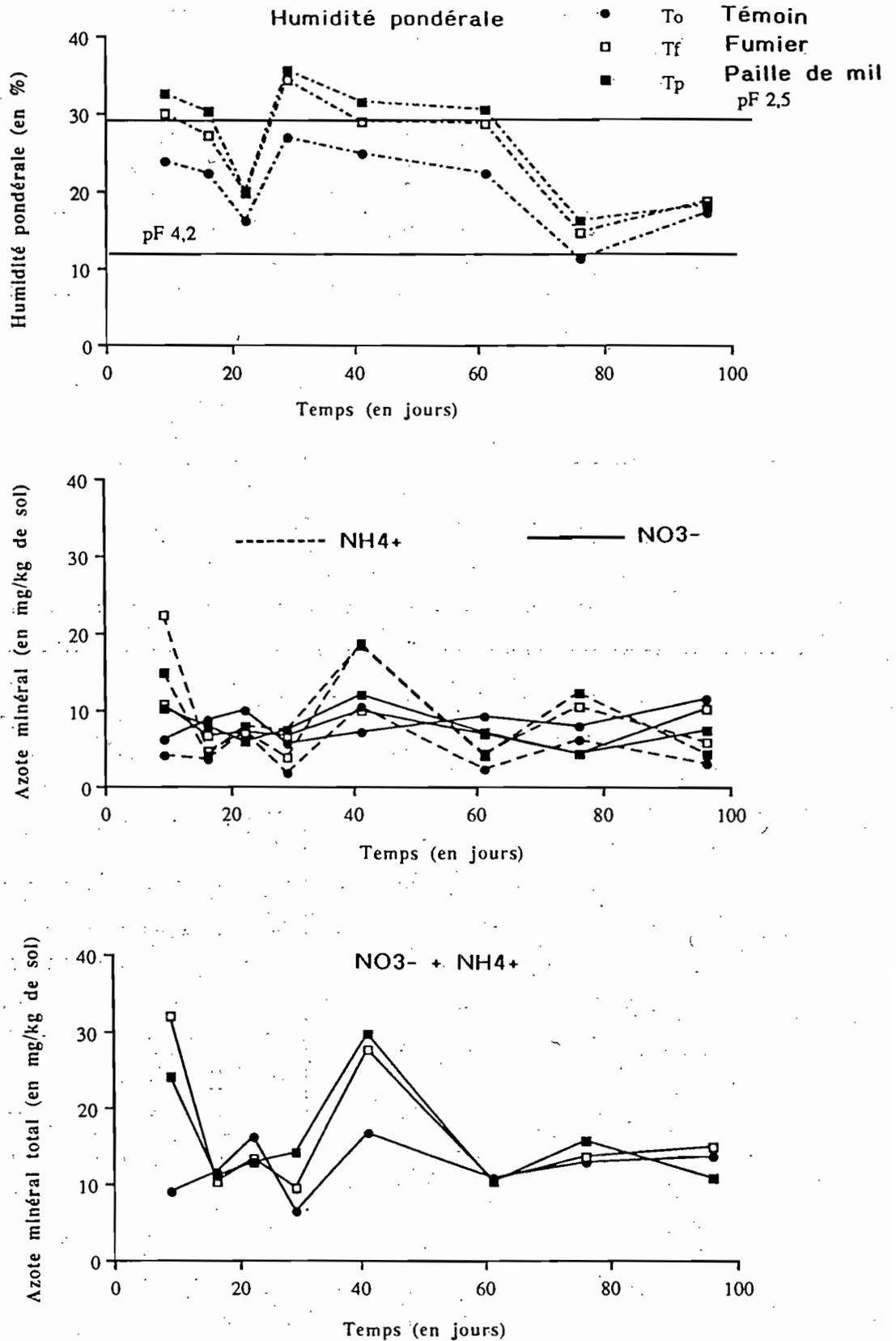


Figure XI.2 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de bas-fond incubé *in situ* (1ère saison)



La seconde phase est comprise entre 30 et 60 JAI. Elle est marquée par une augmentation, à 50 JAI, suivie par une baisse des teneurs. Pendant cette phase les teneurs en NH_4^+ sont relativement plus élevées que celles en NO_3^- quel que soit le traitement. Les teneurs en azote minéral de Tf et Tp sont significativement plus élevées que celles de To.

La troisième phase va de 60 à 95 JAI. Dans Tf et Tp, les teneurs en NH_4^+ qui sont à un niveau plus bas à 60 JAI augmentent et dépassent, à 75 JAI, celles en NO_3^- . Les teneurs en NO_3^- par contre, diminuent légèrement à 75 JAI avant de remonter à leur niveau de 60 JAI. Pendant cette phase, c'est seulement à 75 JAI que les teneurs en NH_4^+ sont supérieures à celles de NO_3^- pour Tf et Tp.

Ces résultats montrent que la variation des teneurs est plus importante pour l'azote NH_4^+ et relativement plus faible pour NO_3^- , contrairement à ce qui a été observé dans le sol sableux de mi-pente.

1.2. Discussion

1.2.1. Minéralisation nette au cours de la saison

Le suivi de l'azote minéral qui va du 7 juillet au 16 octobre 1989, englobe les deux dernières périodes de l'évolution de l'humidité du sol décrites dans le chapitre VII et qui sont favorables à l'activité biologique. Ceci explique la présence de l'azote minéral tout au long de la saison. Mais les teneurs en azote minéral du sol dépendent des différents processus qui conduisent à des pertes (absorption racinaire, lixiviation, réorganisation et dénitrification). L'expérimentation ayant été conduite en sol nu, on peut d'ores et déjà négliger l'effet de l'absorption racinaire.

La réorganisation de l'azote minéral est également un processus important dans ces sols comme cela a été expliqué dans le chapitre VIII. Elle a dû être particulièrement forte dans les traitements poudrette de fumier et paille de mil qui accroissent les besoins azotés de la microflore par une stimulation de l'activité biologique. Leur rapport C/N varie de 21 à 36. Ceci pourrait expliquer l'enrichissement en azote de la fraction argilo-limoneuse en azote total que nous avons évoqué au chapitre X.

La lixiviation de l'azote minéral s'est sans doute produite du fait de la relativement forte pluviométrie qui a caractérisé cette période de la saison. Les sacs ayant été enfouis dans la couche 0-15 cm, son effet pourrait être important dans les conditions de mi-pente où le sol est plus drainant, en particulier au cours des 2 premiers mois où l'humidité est restée voisine ou supérieure à pF 2,5.

Les conditions de forte humidité et la présence de substrat organique, surtout dans Tf et Tp, sont favorables à la dénitrification biologique (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 et PATRICK, 1974). Le bas-fond qui a connu deux épisodes de submersion (12 au 25 août et 10 et 15 septembre) a sans doute été le plus affecté. Dans ce sol également, plus riche en argile, il y a un risque de rétrogradation de l'azote NH_4^+ (de BOISSEZON *et al.*, 1992) qui concernerait plus les traitements Tf et Tp libérant plus d'azote ammoniacal.

L'ensemble des pertes d'azote minéral par lixiviation, dénitrification ou par tout autre processus conduisant à une sortie d'azote du sol incubé, explique la diminution de l'azote total au cours de l'incubation.

1.2.2. Effet des conditions pédoclimatiques

Les résultats montrent que dans le sol sableux de mi-pente, quels que soient le traitement et la date de prélèvement, il y a une prédominance des nitrates. Il n'en est pas de même pour le sol de bas-fond. Dans ce dernier en effet, les prélèvements qui suivent une submersion présentent des teneurs en azote NH_4^+ plus élevées quel que soit le traitement. L'effet est particulièrement net dans les traitements poudrette de fumier et paille de mil. Ceci semble être en accord avec les effets de l'excès d'humidité sur la dynamique de l'azote, décrits par plusieurs auteurs (STEVENSON, 1965 ; DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 et PATRICK *et al.*, 1974). En effet, l'ammonification qui est le processus de minéralisation de l'azote organique est peu sensible aux conditions d'humidité et s'accroît en présence de substrats organiques. Alors que la nitrification qui transforme l'azote NH_4^+ libéré en azote nitrique, est quant à elle ralentie par les excès d'humidité. Ceci conduirait à une accumulation de NH_4^+ pendant les périodes d'excès d'eau. Cependant, dans la couche de surface, l'excès d'eau produit rarement une anaérobiose absolue qui permettrait un blocage total de la nitrification. PATRICK (1982) montre que la diffusion de l'oxygène contenu dans la lame d'eau, entraîne des conditions d'aérobiose des premiers millimètres du sol. Cela suffirait à expliquer la présence de l'azote NO_3^- pendant les phases d'inondation. Par ailleurs, les prélèvements ayant été faits dans des conditions d'humidité normale, il est possible que la nitrification reprenne dès la disparition de l'excès d'eau.

1.2.3. Effet des apports organiques

Dans les deux conditions pédoclimatiques les résultats montrent que, d'une façon générale, l'apport de la poudrette de fumier ou de la paille de mil augmente les teneurs en azote minéral total par rapport au témoin. Cependant, à 15 JAI, le témoin est

significativement (au seuil de 5 %) supérieur à T_p dans le sol de mi-pente alors que dans le sol de bas-fond, c'est à 21 JAI que T_o a des teneurs plus élevées que celles de T_f et T_p . Ce phénomène a été observé par plusieurs auteurs (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; PICHOT *et al.*, 1974 et 1981, SEDOGO, 1981 ; GIGOU, 1983) qui l'expliquent par l'augmentation de la réorganisation du fait de l'accroissement de l'activité microbienne qu'entraînent les apports organiques. Il concerne les deux traitements dans le bas-fond et seulement le traitement paille de mil en mi-pente. La diminution des teneurs en azote minéral du sol durant les premiers jours après l'apport de substrats organiques est à l'origine de l'effet dépressif qu'ont ces derniers sur les rendements. Mais PICHOT *et al.* (1974) ne l'ont pas observée d'une façon systématique dans les sols sableux dunaire du Niger.

La comparaison des deux traitements (T_f et T_p) révèle que, dans le sol sableux de mi-pente, les teneurs en azote minéral sont significativement plus élevées pour la poudrette de fumier alors que, dans le bas-fond la paille de mil a les plus fortes teneurs, même si la différence est moins nette. Cette différence de comportement s'explique par le fait que, dans le bas-fond, l'azote NH_4^+ est le plus représenté ; or en condition de forte humidité, la paille de mil broyée subit une minéralisation plus intense que la poudrette de fumier.

Les quantités totales d'azote minéralisé entre 8 et 95 JAI, tous sols et traitements confondus, sont significativement liées (seuil de 5 %) à l'azote total des sols à 8 JAI ($r = 0,83$).

2. EVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE MINERAL AU COURS DE LA DEUXIEME SAISON PLUVIEUSE D'INCUBATION (1990)

2.1. Résultats

Les coefficients de variation des teneurs en azote minéral (ANNEXE XI.1), toutes situations confondues, sont compris entre 1 et 31 %.

2.1.1. Sol de mi-pente

Les résultats sont représentés sur la figure XI.3.

Les deux formes d'azote minéral sont présentes dans le sol avec une prédominance des nitrates. Les teneurs en NO_3^- varient de 0,6 à 14,8 mg/kg de sol pour le témoin, de 3,0 à 54,2 mg/kg de sol pour le traitement fumier et de 2,9 à 34,2 mg/kg de sol pour le traitement paille de mil. Celles en NH_4^+ vont, dans le même ordre, de 3,1 à 7,3 mg/kg de sol, de 3,7 à 7,3 mg/kg de sol et de 3,7 à 7,6 mg/kg de sol.

La variation au cours de la saison (fig. XI.3) montre une diminution des teneurs en azote NO_3^- . Cette baisse commence dès le 21^{ème} jour après la reprise des pluies (soit à 372 JAI) pour To et à partir du 28^{ème} (380 JAI) et du 65^{ème} jour (410 JAI) respectivement pour Tf et Tp. Les teneurs en azote NH_4^+ par contre, présentent un léger maximum à 372 JAI quel que soit le traitement.

Les teneurs en azote minéral du témoin sont significativement plus faibles par rapport à Tf et Tp, montrant ainsi un arrière-effet bien marqué de ces derniers. La différence entre Tf et Tp est significative seulement en début (365 et 372 JAI) que Tf est supérieur à Tp.

2.1.2. Sol de bas-fond

Les résultats sont représentés sur la figure XI.4.

On observe la présence de l'azote NH_4^+ et NO_3^- avec, comme dans le sol de mi-pente, une prédominance de l'azote nitrique dont les teneurs varient de 7,1 à 74,3 mg/kg de sol, de 7,2 à 78,2 mg/kg de sol et de 9,1 à 87,5 mg/kg de sol. Les teneurs en azote NH_4^+ varient de 2,4 à 21,1 mg/kg de sol, de 2,5 à 20,5 mg/kg de sol et de 4,1 à 20,7 mg/kg de sol.

La variation au cours de la saison montre une augmentation des teneurs à 372 JAI suivie d'une baisse brutale quel que soit le traitement.

La comparaison des traitements montre que Tf et Tp se distinguent d'une façon significative de To surtout en début de saison (365 JAI) où les teneurs du témoin sont 2 fois plus faibles. Pour Tf et Tp, les teneurs sont plus élevées dans le dernier quelle que soit la date de prélèvement.

2.2. Discussion

Le suivi de l'azote minéral s'étalant du 7 juillet au 20 août 1990, se situe dans la période humide qui suit la reprise des pluies. Mais contrairement à la saison de 1989, cette période n'a pas connu d'inondation. Les conditions hydriques ont permis une minéralisation nette de l'azote avec une prédominance de NO_3^- quels que soient le sol et le traitement.

C'est surtout au cours des 2 à 3 premières semaines après la reprise des pluies que la minéralisation nette est élevée dans tous les traitements. Ceci a aussi été observé au cours du suivi au champ (chapitre VIII). L'augmentation des teneurs en azote minéral en début de saison correspond au pic de minéralisation qui apparaît presque toujours dans la dynamique de l'azote sous climats tropicaux (GREENLAND, 1958 ; BLONDEL, 1971a ; PICHOT *et al.*, 1974 ; GIGOU, 1983 ; GANRY, 1990 et POSS, 1991)

Figure XI.3 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de mi-pente incubé *in situ* (2ème saison)

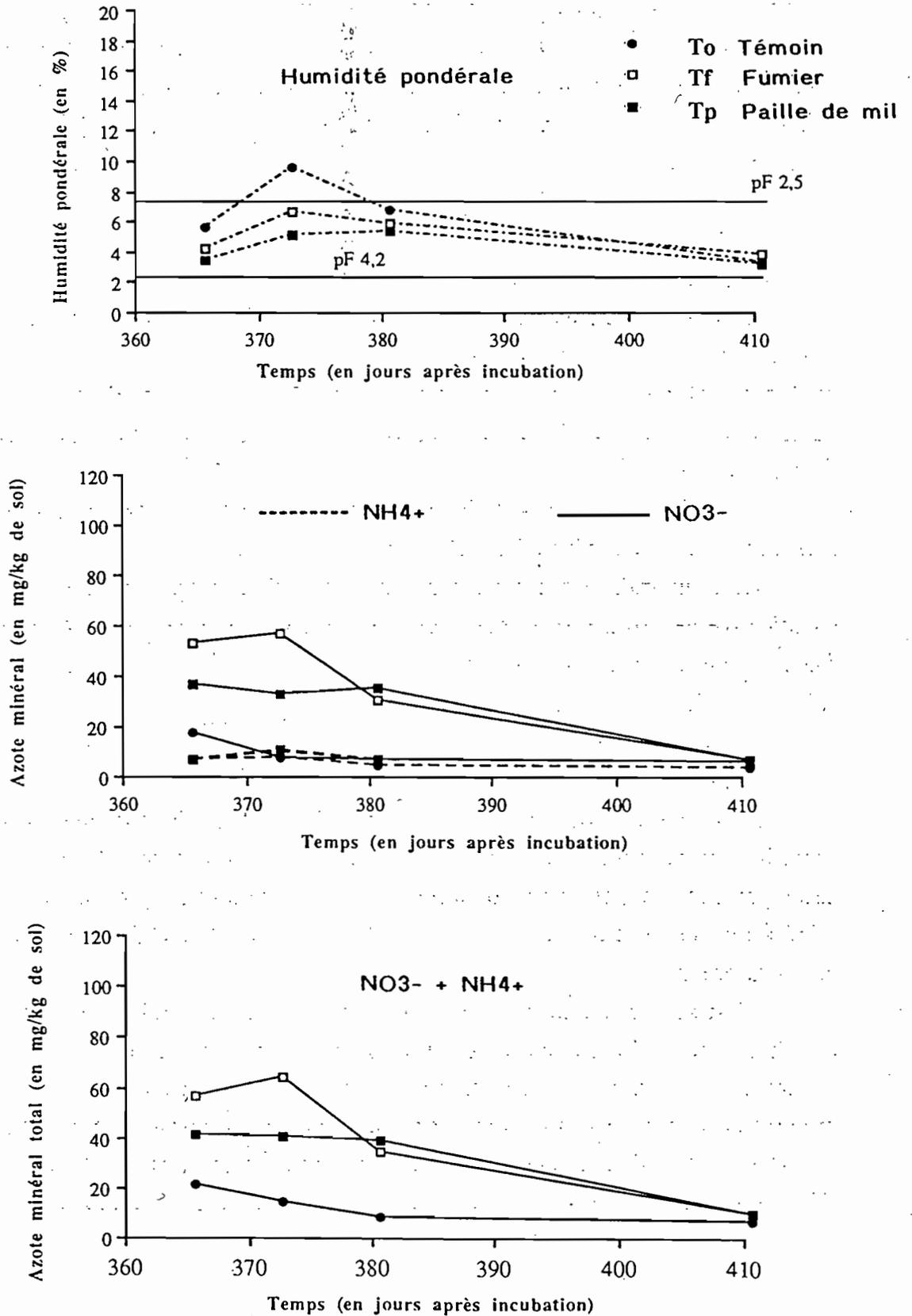
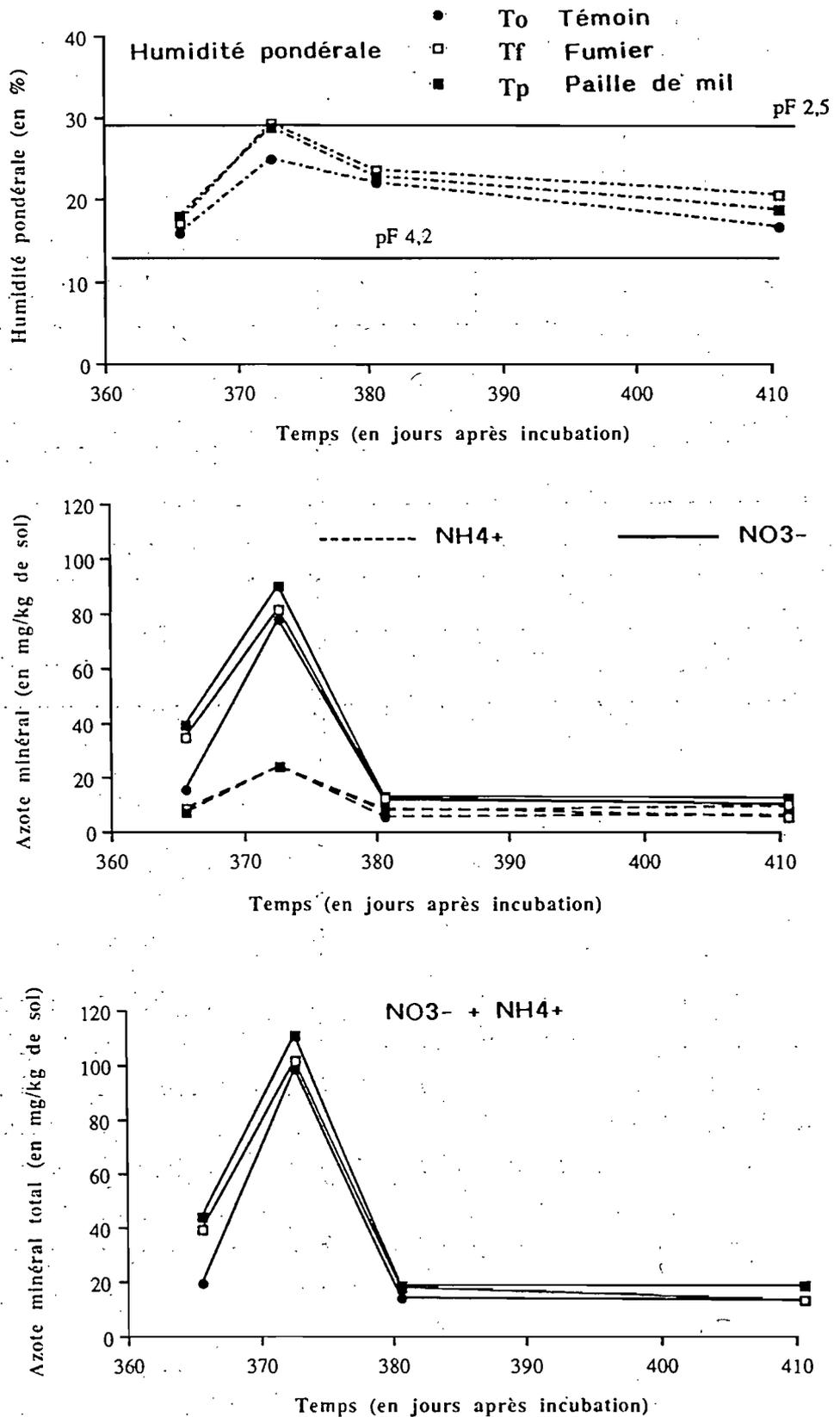


Figure XI.4 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de bas-fond incubé *in situ* (2ème saison)



La chute rapide pourrait être expliquée par les mêmes processus de pertes d'azote minéral décrits dans le chapitre VIII. On notera cependant que la baisse est plus importante dans le sol de bas-fond. Cette différence avec le sol sableux pourrait être liée à une réorganisation plus forte dans ce dernier surtout pour les traitements poudrette de fumier et paille de mil qui contiennent plus de substrats carbonés. En effet, la dynamique du carbone (chapitre X) montre qu'après la première saison, seulement 33 à 43 % du carbone incorporé dans le bas-fond contre 61 à 67 % pour le sol sableux, ont été décomposés.

Les résultats montrent un arrière-effet des traitements poudrette de fumier et paille de mil bien marqué tout au long de la seconde saison. En effet Tf et Tp ont des teneurs en azote minéral plus élevées que celles du témoin quel que soit le type sol. Des observations similaires ont été faites par PICHOT *et al.* (1974 et 1981), SEDOGO (1981) et GIGOU (1983). Ceci s'explique par la dynamique de l'azote total dans les fractions du sol. En s'accumulant dans la fraction fine l'azote subit une biodégradation moins rapide. L'arrière-effet est important dans le sol sableux où les teneurs en azote minéral du témoin sont 2 à 5 fois inférieures à celles de Tf et Tp. Dans le bas-fond par contre, c'est surtout en début de saison (365 JAI) que la différence est importante (2 à 3 fois). On pourrait attribuer cette différence de comportement entre les deux sols aux très faibles teneurs en azote total du sol sableux non amendé.

Dans le sol sableux l'arrière-effet est plus important pour la poudrette de fumier à 365 et 372 JAI alors que dans le bas-fond, c'est la paille de mil qui provoque un arrière-effet plus élevé. Ceci semble être en accord avec la cinétique de décomposition de la matière organique incorporée. Car, moins celle-ci est décomposée la première année, plus l'arrière-effet est élevé.

3. CONCLUSION

Les résultats montrent que, dans les deux sols, la minéralisation nette de l'azote se produit durant toute la saison quel que soit le traitement. Dans le sol sableux en mi-pente, l'azote nitrique est la forme prédominante alors que dans le sol de bas-fond, en période de forte humidité du sol (submersion), l'ammonification nette qui augmente en présence de la poudrette de fumier ou de la paille de mil, semble l'emporter. Ce qui est conforme avec la dynamique de l'azote minéral en fonction des conditions d'humidité.

L'apport de matière organique (poudrette de fumier et paille de mil) augmente les teneurs en azote minéral dans les deux sols par rapport au témoin. Cependant, durant les 2 à 3 premières semaines les teneurs en azote minéral peuvent baisser considérablement dans les traitements Tf et Tp. Ceci pourrait se traduire par une faim d'azote pour les plantes cultivées. Cet effet dépressif est relativement plus élevé dans les

conditions de bas-fond. Toutefois le sol de bas-fond contient davantage d'azote minéral que le sol de mi-pente.

Un arrière-effet bien marqué des deux apports organiques sur l'augmentation des teneurs en azote minéral par rapport au témoin est observé pendant la seconde saison et surtout pendant les 2 à 3 premières semaines qui suivent l'installation effective de la saison. Cet effet semble plus marqué dans le sol de mi-pente que dans le sol de bas-fond. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, les écarts des teneurs en azote total entre les traitements poudrette de fumier et paille de mil et le témoin, sont plus élevés pour le sol sableux de mi-pente.

La comparaison des traitements montre que dans le sol sableux en mi-pente la poudrette de fumier augmente plus les teneurs en azote minéral que la paille de mil. Dans le bas-fond par contre, la différence n'est pas grande entre Tf et Tp.

La minéralisation nette de l'azote dans les deux sols est similaire à celle observée lors du suivi au champ (chapitre VIII), à savoir qu'elle se déroule tout au long de la saison avec d'une façon générale une prédominance de l'azote NO_3^- . Mais en condition de forte humidité dans le bas-fond il y aurait ralentissement de la nitrification avec une accumulation de l'ammonium. Cependant, les résultats ne permettent pas de préciser les effets du moment et de la durée de la submersion sur la dynamique de l'azote. Cette question sera étudiée dans le chapitre XII:

CHAPITRE XII

EFFET DES CONDITIONS HYDRIQUES DE BAS-FOND SIMULEES AU LABORATOIRE, SUR LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE MINERAL EN PRESENCE OU NON DE POUDRETTE DE FUMIER

Ce chapitre est consacré à l'étude des transformations de l'azote minéral dans un sol de bas-fond sous l'influence des conditions hydriques simulées au laboratoire. Les résultats obtenus avec et sans apport de poudrette de fumier sont présentés et discutés de façon à mettre en évidence les effets des conditions de la submersion sur la minéralisation nette de l'azote.

1. RESULTATS

L'évolution de l'azote minéral dans les traitements est représentée dans la figure XII.1.

1.1. Minéralisation nette en conditions hydriques normales

Les conditions hydriques normales correspondent à une humidité du sol proche de 60 % de la capacité au champ. Elles sont représentées par les traitements TAO et TAF respectivement sans et avec poudrette de fumier.

Dans le sol sans poudrette de fumier (TAO), la minéralisation nette se caractérise par une augmentation des teneurs en azote NO_3^- (15,1 à 38,4 mg/kg de sol) et une diminution de celles en azote NH_4^+ (11,0 à 0,4 mg/kg de sol). En présence de la poudrette de fumier TAF, les teneurs en azote NO_3^- et NH_4^+ chutent considérablement dès la première semaine. Elles passent de 15,1 à 0 mg/kg de sol pour NO_3^- et de 11,2 à 0,5 mg/kg de sol pour NH_4^+ . L'apport de la poudrette de fumier se traduit par une importante immobilisation de l'azote minéral du sol pendant les 6 semaines d'incubation.

1.2. Minéralisation nette de l'azote en fonction des conditions de submersion

1.2.1. Azote minéral après une submersion du sol sec

Les traitements correspondants sont TBo et TBf respectivement sans et avec poudrette de fumier où les échantillons séchés à l'air ont été submergés (avec une lame d'eau) sans humectation préalable.

La minéralisation nette dans le traitement TBo est marquée par la quasi-disparition de l'azote NO_3^- dès la première semaine (15,1 à 0,3 mg/kg de sol) et par une augmentation progressive des teneurs en azote NH_4^+ (11,0 à 18,7 mg/kg de sol). Dans le traitement TBf la minéralisation nette montre, comme dans TBo la même évolution pour l'azote NO_3^- . Pour l'azote NH_4^+ par contre, la variation des teneurs suit deux phases. La première phase dure les 2 premières semaines et est marquée par une augmentation des teneurs (11,6 à 34,6 mg/kg de sol). Pendant le reste de l'incubation il se produit une baisse progressive des teneurs en NH_4^+ (34,6 à 14,0 mg /kg de sol).

La submersion d'un sol séché à l'air entraîne une augmentation de l'ammonification nette et un ralentissement voire un arrêt de la nitrification nette. En présence d'apport organique, la nitrification suit la même évolution alors que l'ammonification nette passe par un maximum avant de diminuer après 3 semaines.

1.2.2. Azote minéral après une submersion du sol préalablement humidifié

Contrairement à la précédente, la submersion intervient ici sur un sol humidifié normalement (60 % de la capacité de rétention en eau) pendant deux semaines. Les résultats sont présentés en fonction de la durée de submersion.

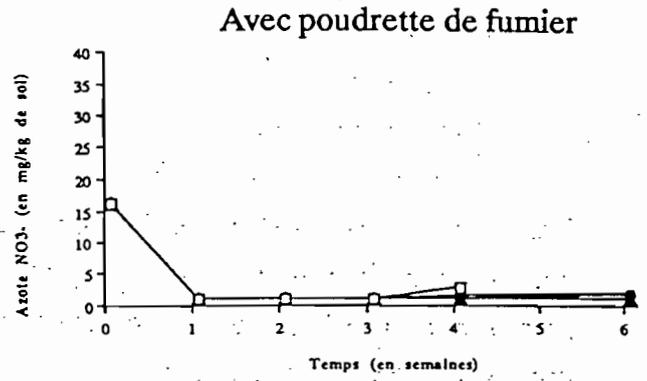
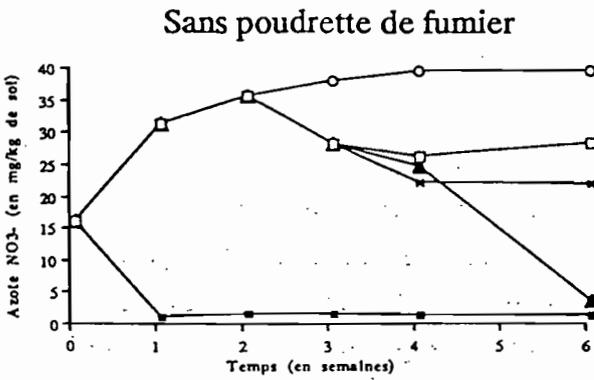
1.2.2.1. Submersion de longue durée

Les traitements correspondants sont TCo et TCf où les échantillons humidifiés pendant deux semaines sont submergés durant quatre semaines.

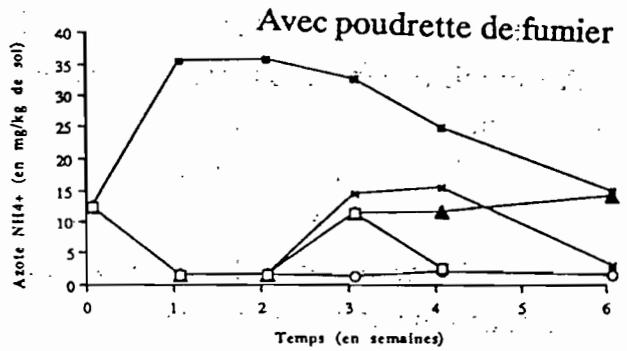
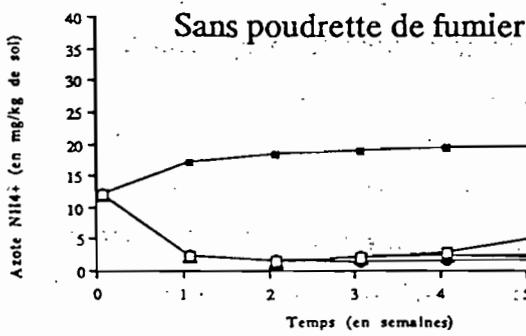
Dans le traitement sans poudrette de fumier les teneurs en azote NO_3^- augmentent comme dans TAO pendant les 2 premières semaines (15,1 à 34,6 mg/kg de sol) avant de diminuer régulièrement au cours de la submersion (34,6 à 2,6 mg/kg de sol). Les teneurs en azote NH_4^+ diminuent également comme dans TAO et augmentent très légèrement pendant la submersion (0,4 à 1,4 mg/kg de sol). Pour le traitement TCf, pendant les 2 premières semaines les teneurs en NO_3^- et NH_4^+ baissent comme dans

Figure XII.1 : Minéralisation nette de l'azote dans un sol bas-fond incubé avec et sans poudrette de fumier en fonction des conditions hydriques simulées au laboratoire

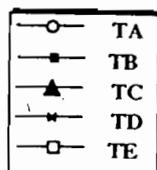
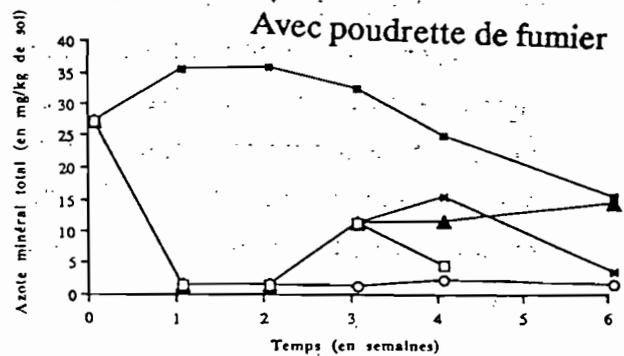
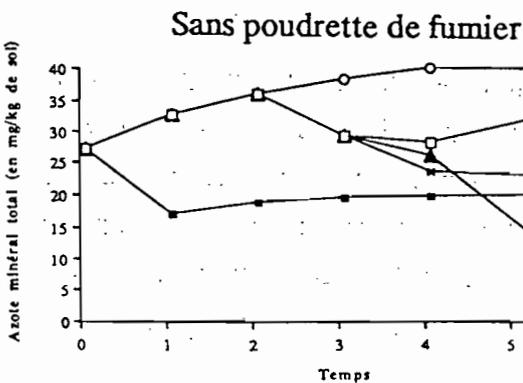
Azote nitrique NO₃⁻



Azote ammoniacal NH₄⁺



Azote minéral total NO₃⁻ + NH₄⁺



TAf. Au cours de la submersion, les teneurs en NO_3^- restent quasiment nulles alors que celles en NH_4^+ augmentent en une semaine (0,4 à 13,1 mg/kg de sol).

Lorsque la submersion intervient sur un sol préalablement humidifié, on observe les mêmes phénomènes que dans les traitements TBo et TBf. Mais ils sont faibles en intensité pour ce qui concerne l'ammonification nette alors que la disparition de l'azote NO_3^- est plus forte.

1.2.2.2. Submersion de courte durée

Dans ces conditions hydriques, le sol mélangé ou non à la poudrette de fumier et préalablement humidifié à 60 % de la capacité de rétention en eau, est submergé pendant une semaine. Les traitements correspondants sont d'une part TDo et TDf dans lesquels la submersion est suivie par un dessèchement lent et d'autre part TEo et TEf où le dessèchement après la submersion est rapide.

a) Submersion de courte durée avec un dessèchement lent

Dans le traitement TDo une semaine de submersion entraîne une diminution des teneurs en azote NO_3^- qui continue une semaine après l'application du dessèchement lent (34,6 à 21,2 mg/kg de sol). Puis les teneurs restent à ce niveau jusqu'à la fin de l'incubation. Par contre, la submersion ne modifie pratiquement pas les teneurs en azote NH_4^+ . En présence de la poudrette de fumier, ce sont les teneurs en azote NO_3^- qui ne sont pas modifiées par une semaine d'excès d'eau (elles restent nulles). Par contre, elle provoque une augmentation des teneurs en azote NH_4^+ jusqu'à une semaine après l'application du dessèchement (0,4 à 14,3 mg/kg de sol). Après cette phase d'augmentation les teneurs baissent rapidement durant les deux dernières semaines (14,3 à 2,1 mg/kg de sol). Cette baisse des teneurs en absence d'excès d'eau peut être attribuée à la réorganisation de l'azote.

b) Submersion de courte durée avec un dessèchement rapide

Dans les traitements TEo et TEf on observe les mêmes phénomènes que précédemment mais le dessèchement rapide de 2 à 3 jours permet de limiter la diminution des teneurs en azote NO_3^- dans TEo (34,6 à 25,3 mg/kg de sol) et l'augmentation de celles en azote NH_4^+ de TEf (0,4 à 10,3 mg/kg de sol). Dans ce dernier, la phase de diminution de NH_4^+ commence dès l'application du dessèchement.

Les résultats de la submersion de courte durée montrent qu'en absence de poudrette de fumier, il y a une reprise de la minéralisation avec une prédominance de la nitrification dès que l'excès d'eau disparaît rapidement ou lentement. En présence de la poudrette de fumier, l'azote ammoniacal produit pendant la submersion est réorganisé dès que l'excès d'eau disparaît (rapidement ou lentement).

2. DISCUSSION

En condition hydrique normale (60 % de la capacité maximale de rétention en eau) la minéralisation nette est similaire à celle observée dans le chapitre VIII. Il y a une augmentation des teneurs en azote minéral avec une prédominance des nitrates. Par contre en présence de la poudrette de fumier (traitement TAf) la minéralisation nette est très faible à nulle. Ceci peut être attribué à la forte réorganisation de l'azote minéral qui accompagne l'incorporation au sol de la matière organique à rapport C/N élevé (CRASWELL, 1978 ; WEERARATNA, 1979 , AZAM *et al.*, 1985 et ROCHESTER *et al.*, 1991). L'apport de la poudrette de fumier augmente le rapport C/N du sol de 12 à 36. INUBUSHI *et al.* (1985) montrent aussi que la baisse de la minéralisation nette peut être liée à l'adsorption des substances organiques azotées sur les argiles. L'effet de l'apport organique sur la baisse des teneurs en azote minéral par rapport au témoin, a été aussi observé au cours des 2 à 3 premières semaines de l'expérimentation *in situ* (chapitre XI). Cependant, on n'y note pas une disparition presque totale de l'azote minéral comme ce qui est observé au laboratoire. Cette différence pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité, et des conditions hydriques, et des facteurs influençant la dynamique de l'azote *in situ*.

Le changement des conditions hydriques par l'application de la submersion entraîne des modifications de la dynamique de l'azote minéral variables suivant la présence ou non d'apport organique. L'effet de la submersion tient au fait que cette dernière modifie l'ambiance physico-chimique des sols (PONNAMPERUMA, 1972 ; PATRICK, 1974 et 1982 et VIZIER, 1977 et 1983). C'est ainsi qu'il se produit, de façon plus importante en présence d'un apport organique, une augmentation du pH et une diminution du potentiel d'oxydo-réduction. La diminution du taux d'oxygène du sol est à l'origine de ces transformations. Elle constitue, selon PATRICK (1982), le principal facteur affectant la transformation de l'azote dans les sols submergés. D'après cet auteur, l'oxygène se répartit d'une manière très hétérogène dans la couche superficielle d'un sol submergé, en raison des échanges gazeux entre l'atmosphère et la lame d'eau. Ce qui rend possible, dans cette couche, un déroulement simultané des différents

processus de transformation de l'azote (ammonification, nitrification, réorganisation et dénitrification).

2.1. Effet de la submersion sur la minéralisation nette de l'azote d'un sol sec

Dans ces conditions, le sol sec est brutalement soumis à un excès d'eau. Cela a pour conséquence une destruction des agrégats (HENIN, 1969) pouvant conduire rapidement à une situation d'anaérobiose. Ces conditions hydriques sont rarement rencontrées dans la plupart des bas-fonds non-aménagés du fait de la répartition des pluies au cours de la saison (chapitre VII). Mais dans les bas-fonds dont l'aménagement (diguettes, digues) permet une retenue d'eau, cette situation peut se produire après les premières grosses pluies exceptionnelles.

Les résultats montrent que la submersion d'un sol séché à l'air entraîne, d'une part une accumulation d'azote NH_4^+ d'autant plus importante qu'il y a un apport de matière organique et d'autre part une quasi-disparition de l'azote NO_3^- . L'ammonification, peu sensible aux conditions hydriques semble l'emporter par rapport à la nitrification qui est inhibée par les fortes humidités. PONNAMPERUMA (1972) rapporte qu'au bout de deux semaines de submersion la presque totalité de l'azote minéralisable du sol est ammonifié. On comprend donc pourquoi les teneurs en NH_4^+ sont plus élevées dans le traitement avec poudrette de fumier (Tbf). Dans ce dernier, cependant, on observe une diminution des teneurs en NH_4^+ à partir de la 3^{ème} semaine de submersion. Cette baisse peut être due à une réorganisation microbienne dont CRASWELL (1984) et PATRICK (1982) signalent l'importance en présence d'apport organique. Mais cela peut s'expliquer par une fixation de l'azote NH_4^+ par les argiles.

Dans le sol non traité avec la poudrette de fumier, la minéralisation nette de l'azote ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) en condition de submersion (TBo) est 2 fois plus faible que celle obtenue sans submersion (TAo).

2.2. Effet de la submersion sur la minéralisation nette de l'azote d'un sol préalablement humidifié

A la différence de la précédente, cette submersion survient sur un sol préalablement humidifié. Cela permet d'éviter une installation très rapide de condition d'anaérobiose en limitant destruction des agrégats du sol. Par ailleurs, la submersion intervient à un moment où le sol contient plus d'azote NO_3^- . En effet, l'humidification normale d'un sol sec favorise le développement de l'activité biologique, notamment de la minéralisation de l'azote avec une prédominance de la nitrification (cf. chapitre V).

Ces conditions hydriques sont caractéristiques de beaucoup de bas-fonds de la zone étudiée en année pluvieuse comme celle de 1989.

D'une façon générale on observe les mêmes phénomènes d'évolution de l'azote NH_4^+ avec cependant une intensité beaucoup plus faible. L'augmentation des teneurs en azote NH_4^+ au cours de la submersion confirme les observations faites *in situ* (chapitre XI). Par contre, l'azote NO_3^- accumulé durant la première phase subit une dénitrification progressive au cours de la submersion.

Dès la disparition de l'excès d'eau, la minéralisation nette de l'azote redevient caractéristique des conditions hydriques optimales. En l'absence d'apport organique, les teneurs en azote NO_3^- augmentent (TDo et TEO). Par contre en présence de poudrette de fumier (TDf et TEf), la réorganisation microbienne de l'azote l'emporte comme dans le traitement TAf avec une diminution rapide des teneurs en NH_4^+ accumulées au cours de la submersion. Mais le fait important qui mérite d'être souligné, est la persistance de l'effet de la submersion 1 à 2 semaines après la disparition de la lame d'eau dans le cas du traitement avec dessèchement lent (TD). Ceci correspond à une phase d'engorgement où le sol est encore saturé d'eau.

On retiendra que la submersion d'un sol non amendé préalablement humidifié entraîne une diminution des teneurs en azote minéral total ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) proportionnelle à la durée de la submersion. Cette baisse qui représente en une semaine 19,2 % de l'azote minéral total avant la submersion, atteint 88 % en 4 semaines. Au contraire dans un sol ayant reçu de la matière organique, les teneurs en azote minéral augmentent très fortement avec la durée de la submersion.

3. CONCLUSION

Cette expérience de laboratoire a été conduite pour mieux comprendre l'effet de l'excès temporaire d'eau survenant dans les sols de bas-fond au cours de la saison pluvieuse, sur les transformations de l'azote minéral.

Les résultats montrent que dans les conditions d'humidité optimales (60 % de la capacité au champ), les teneurs en azote minéral dans le sol non amendé augmentent progressivement avec une prédominance de NO_3^- sur NH_4^+ . Mais en cas d'apport de la poudrette de fumier, les teneurs en azote minéral initial (avant l'humectation) baissent fortement dès la première semaine et restent à un niveau très faible. Ceci révèle une réorganisation microbienne de l'azote minéral lié à l'accroissement de l'activité biologique qu'entraîne la présence de matière organique à rapport C/N élevé (36). La baisse des teneurs en azote minéral dans le sol amendé a été également observée *in situ*

(chapitre XI) mais avec la différence qu'il n'y a pas une disparition totale de l'azote minéral.

Lorsque des conditions d'excès d'eau interviennent brutalement sur un sol sec, la minéralisation de l'azote conduit à une augmentation des teneurs en NH_4^+ et à une disparition rapide de NO_3^- initial. Cela est dû au fait que l'ammonification est peu sensible aux conditions d'anaérobiose créées par l'excès d'eau alors que la nitrification est inhibée. Un apport de la poudrette de fumier, en augmentant l'azote minéralisable du sol, permet un accroissement des teneurs en NH_4^+ par rapport à un sol non amendé. La submersion entraîne aussi une diminution de l'activité biologique globale dans le sol non amendé expliquant les plus faibles teneurs en azote minéral total ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) par rapport aux conditions d'humidité optimales.

Mais dans la plupart des bas-fonds de la zone concernée, l'excès d'eau temporaire survient généralement sur des sols déjà réhumidifiés comme cela a été le cas en 1989 (chapitre IX).

Dans ces conditions, pour un sol non amendé, la submersion intervient à un moment où les teneurs en NO_3^- sont élevées. Il se produit au cours de la submersion une baisse progressive des teneurs en NO_3^- (19,2 % en une semaine à 88 % en quatre semaines). Alors que les teneurs en NH_4^+ augmentent mais restent très faibles car une grande partie de l'azote facilement minéralisable a été nitrifié durant la première phase d'humectation. Mais en cas d'apport de poudrette de fumier, les teneurs en NH_4^+ augmentent fortement et régulièrement. Ces résultats confirment les observations faites *in situ* (chapitre XI). Cela révèle un effet négatif de l'excès d'eau temporaire sur les teneurs en azote minéral total ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) d'un sol cultivé sans apport de matière organique. Ce qui peut conduire à une faim d'azote pour les plantes cultivées pendant la durée de la submersion. Par contre dans le cas d'un sol amendé, la submersion temporaire entraîne une augmentation des teneurs en azote minéral (NH_4^+ essentiellement).

La conséquence de cette dynamique sur l'alimentation azotée dépendra des plantes cultivées qui peuvent supporter ou pas les conditions d'aérobiose accompagnant la submersion.

CONCLUSION DE LA QUATRIEME PARTIE

L'objet de cette partie était d'étudier l'influence à court terme des conditions pédoclimatiques et des apports organiques sur l'évolution de la matière organique et de l'azote minéral des sols.

Les résultats montrent qu'en l'absence de tout apport organique, les pertes en carbone organique et azote totaux sont faibles en raison du fait que la plus grande partie des teneurs des deux sols (68 et 80 % pour le carbone organique total et 71 et 96 % pour l'azote total) se trouve dans la fraction $< 50 \mu\text{m}$ qui est plus stable. Cependant, les pertes sont proportionnelles aux teneurs en carbone organique et azote totaux des sols. Elles sont relativement plus élevées pour le sol de bas-fond (18 et 19,3 % des teneurs initiales respectivement pour le carbone organique et le l'azote totaux) que pour le sol de mi-pente (4,5 et 9,5 %). Cette relative supériorité du sol de bas-fond peut aussi s'expliquer par le fait que, après une saison de pluviosité moyenne comme celle de 1989, l'humidité du sol reste longtemps favorable à l'activité biologique alors que le sol sableux se dessèche relativement vite.

Concernant les traitements poudrette de fumier et paille de mil, les pertes en carbone organique et azote totaux sont liées à la texture du sol. Pour le carbone organique total la décomposition décroît du sol ferrugineux sableux de mi-pente (68,5 à 73 % du carbone initial) au sol hydromorphe argilo-limoneux de bas-fond (56,5 à 58,3 %) ; la demi-vie moyenne est de 18 jours dans le premier contre 41 jours pour le second. Les pertes en azote total suivent une tendance similaire avec 29,2 à 36,6 % pour le sol sableux contre 21 à 25 % pour le sol argilo-limoneux. La texture plus argileuse du sol de bas-fond peut favoriser une protection de la matière organique incorporée contre la biodégradation. Ce qui expliquerait la différence de décomposition avec le sol sableux. Mais, il y a aussi le fait que les conditions hydriques de 1989 ont été marquée par des périodes d'excès d'eau qui ont pu entraîner une baisse de l'activité biologique.

Dans les deux sols, la décomposition de la paille de mil broyée à 2 mm est plus rapide que celle de la poudrette de fumier. Pour le carbone organique total, le coefficient de décomposition k est de 0,052 et 0,019 $\%.\text{jour}^{-1}$ respectivement dans le sol de mi-pente et celui de bas-fond pour la paille de mil alors qu'il est, dans le même ordre, de 0,033 et 0,015 $\%.\text{jour}^{-1}$ pour la poudrette de fumier. Cette rapide décomposition de la paille de mil s'explique par sa richesse en composés fermentescibles (cellulose) dont la mise en contact avec les microorganismes, a été favorisée par le broyage.

Malgré cette rapide décomposition, l'apport de la matière organique accroît les stocks de carbone organique total et d'azote total par rapport au témoin. Cette augmentation, relativement plus élevée pour la poudrette de fumier, est du même ordre de grandeur dans les deux sols. Les gains vont de 23 à 25 % du carbone organique total et de 55 à 59 % de l'azote total pour la poudrette de fumier. Ils sont de 14,5 à 18,4 % du carbone organique total et de 38 à 43 % de l'azote total pour la paille de mil. Le fractionnement granulométrique de la matière organique montre que, pour les deux sols, la plus grande partie des gains en carbone organique total (57 à 71 %) se trouve dans la fraction grossière 2000-50 μm qui est plus labile. Pour l'azote total par contre, 58 à 80 % des gains se trouvent dans la fraction $< 50 \mu\text{m}$ du sol sableux alors que dans le sol argilo-limoneux de bas-fond cette fraction n'en contient que 38 % en moyenne. Ce qui semble révéler un comportement différent des deux sols vis-à-vis des processus de minéralisation-réorganisation de l'azote qui permettent l'accumulation de l'azote dans la fraction fine.

L'évolution des teneurs en azote minéral au cours des deux saisons pluvieuses d'incubation, montrent des différences entre les deux sols.

Les résultats obtenus au cours de la première saison d'incubation (1989), montrent que dans le sol sableux de mi-pente, l'azote NO_3^- est la forme prédominante alors que dans le sol de bas-fond, en période de forte humidité du sol (submersion), les teneurs en azote NH_4^+ sont plus élevées, surtout en présence de la poudrette de fumier ou de la paille de mil. On sait que l'ammonification est peu sensible aux conditions d'excès d'eau par rapport à la nitrification qui est inhibée.

L'étude de l'effet de l'excès d'eau temporaire du sol de bas-fond en milieu contrôlé, confirme ces résultats et montre une baisse des teneurs en NO_3^- proportionnellement à la durée de la submersion. Les pertes passent de 19 % en une semaine à 88 % en quatre semaines de submersion. Mais l'effet de la submersion cesse dès la disparition de l'excès d'eau.

L'apport de la poudrette de fumier et de la paille de mil accroît de 2 à 3 fois les teneurs en azote minéral dans le sol sableux mais beaucoup moins dans celui de bas-fond sauf pendant les périodes de submersion. Cependant, dans les deux sols et de façon plus prononcée dans le sol de bas-fond, les teneurs en azote minéral baissent fortement pendant les 2 à 3 premières semaines. Ce phénomène, qui accompagne toujours la décomposition des apports organiques pauvres en azote, est attribué à la réorganisation de l'azote par les microorganismes.

Au cours de la deuxième saison (1990) qui a été moins pluvieuse, les résultats montrent un arrière-effet positif des traitements poudrette de fumier et paille de mil sur la minéralisation nette de l'azote dans les deux sols. Cet effet, qui dure seulement les 2 à 3 premières semaines après la reprise des pluies en juillet, semble plus marqué dans le

sol de mi-pente que dans le sol de bas-fond. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que, les écarts des teneurs en azote total entre les traitements poudrette de fumier et paille de mil d'une part et le témoin d'autre part, sont plus élevés pour le sol sableux de mi-pente. Mais la différence pourrait être aussi attribuée à une réorganisation de l'azote minéral plus importante dans le sol de bas-fond qui, en début de saison, contenait encore plus de matière organique grossière.

On retiendra de l'ensemble de ces résultats que l'apport de la poudrette de fumier et de paille de mil permet, malgré la rapide décomposition de ces amendements, une augmentation du stock de matière organique (carbone organique et azote totaux) et d'azote minéral des sols. Mais concernant l'azote minéral, les baisses des teneurs enregistrées pendant les 2 premières semaines suivant l'apport pourraient conduire à une faim d'azote temporaire pour les plantes surtout dans le bas-fond.

CONCLUSION GENERALE

L'étude des sols cultivés de la région de Bidi, au nord du Burkina Faso, a permis de rassembler, dans les conditions du terrain ainsi qu' au laboratoire, un ensemble de résultats pouvant aider à mieux comprendre le problème d'évolution et d'entretien de leur fertilité.

Les modifications des caractères des sols sous l'influence des systèmes de culture concernent surtout les 10 à 20 premiers centimètres.

Sur le plan morphologique, les facteurs climatiques (pluies, vents et évaporation) tendent à imprimer à la structure de la couche supérieure du sol un caractère massif plus ou moins lité. Cette tendance est liée aux phénomènes de prise en masse, de tassement et d'érosion. Les sols ferrugineux de versant, plus sableux, sont plus sensibles que le sol hydromorphe de bas-fond plus argileux. Les systèmes de culture interviennent surtout sur l'ampleur de cette action qui semble augmenter avec la pratique du labour.

Les effets des systèmes de culture sont plus marqués sur les autres caractères des sols mettant ainsi en évidence les effets de la jachère, de la fumure organique associée ou non au labour, de l'aménagement antiérosif associé au labour et de la culture continue sans labour ni fumure.

La forêt galerie dégradée et la jachère de 15 ans ont un effet favorable sur les stocks organique et minéral des sols. **Dans le bas-fond**, le sol hydromorphe à pseudogley argilo-limoneux sous forêt galerie dégradée a des teneurs en carbone organique total, azote total, bases échangeables, phosphore total et phosphore assimilable deux fois plus élevées que celles du sol cultivé. **En mi-pente**, le sol ferrugineux peu lessivé sableux sous jachère arbustive de 15 ans présente également de meilleures caractères chimiques par rapport au sol cultivé, en particulier ses teneurs en carbone organique et azote totaux qui sont le double de celles des autres. **En bas de pente**, par contre, l'effet de la jachère de 5 ans sur le sol ferrugineux lessivé apparaît faible par rapport aux systèmes de culture comportant plus ou moins une fumure organique associée ou non au labour. On mesure là toute l'importance du facteur temps pour la restauration, après une mise en culture, d'un équilibre édaphique par la reconquête de la végétation naturelle.

Les systèmes de culture continue sans fumure organique, sur les sols de bas-fond et de mi-pente, conduisent à une diminution des niveaux organique et minéral en raison de la faiblesse des restitutions organiques. **Dans le bas-fond**, la culture continue de sorgho pendant plus de 30 ans entraîne une baisse des teneurs en carbone organique et azote totaux (50 %), bases échangeables (33 %), phosphore total (22 %) et phosphore assimilable (58 %) par rapport à la forêt galerie dégradée. **En mi-pente**, également, les teneurs en carbone organique et azote totaux du sol chutent de 40 à 50 % et celles en

bases échangeables de 31 à 33 % dans le sol cultivé par rapport à la jachère arbustive de 15 ans. Toutefois, l'aménagement antiérosif en cordons pierreux isohypses associé au labour permet de maintenir certains caractères du sol (carbone organique total) à un niveau relativement plus élevé que la culture continue sans aménagement. Cela s'expliquerait par un accroissement de biomasse racinaire lié à l'aménagement antiérosif associé au labour.

Les systèmes de culture continue comportant une fumure organique permettent une amélioration des caractères chimiques et une augmentation des stocks organiques des sols en fonction du régime des restitutions organiques. **En bas de pente**, le système de culture associant un parage de bétail et un labour annuels a permis de multiplier par 2 les teneurs en carbone organique total, azote total, bases échangeables et phosphore total et d'augmenter le pH d'une unité par rapport à un système de culture avec une faible fumure organique (une fois tous les 2 à 3 ans), sans labour. Ce dernier est assez comparable à la jachère herbacée de 5 ans. Ces résultats confirment l'effet favorable de fumure organique sur les caractères organique et minéral des sols. Ils montrent également que la pratique de parage, qui permet de concentrer les apports (déjections et urines des animaux et résidus végétaux déchiquetés) sur des portions de parcelle, se révèle efficace en particulier sur le pH.

Le fractionnement granulométrique des échantillons de sol de la couche 0-10 cm où les effets des systèmes de culture sont plus marqués, a permis de séparer la matière organique en deux fractions différentes : la matière organique grossière labile, associée à la fraction sableuse (2000/50 μm) avec un rapport C/N élevé (14 à 38) et la matière organique fine, relativement plus stable, associée à la fraction argilo-limoneuse (<50 μm) et caractérisée par un rapport C/N bas (6,3 à 12). L'importance de chaque fraction dépend du niveau des restitutions organiques. Ainsi, dans les situations où il y a davantage d'apports organiques (sol sous jachère arbustive de 15 ans, sol sous forêt galerie dégradée et sol cultivé avec fumure organique), plus de la moitié du carbone organique total (51 à 56 %) se trouve dans la fraction grossière. Par contre, dans les cas où les apports organiques sont plus réduits (sol cultivé en mi-pente, sol cultivé de bas-fond et sol sous jachère herbacée de 5 ans en bas de pente), c'est la fraction fine qui contient la plus grande partie du carbone organique (56 à 73 %). Mais concernant l'azote total, quelle que soit la situation, 68 à 89 % de l'azote du sol sont contenus dans la fraction fine. Cet effet des systèmes de culture sur la répartition de la matière organique dans les fractions granulométriques peut affecter le comportement des sols, notamment leur aptitude à la minéralisation, eu égard aux propriétés différentes de ces deux fractions.

Le pouvoir minéralisateur des sols, apprécié par la minéralisation du carbone et de l'azote et traduisant l'activité biologique dans le sol, est modifié par les systèmes de culture. Pour la couche 0-10 cm, ces modifications vont dans le même sens que celles des teneurs en carbone organique et azote totaux. En effet, les quantités de carbone et d'azote minéralisés sont significativement liées (seuil de 5 %) aux teneurs en carbone organique total ($r = 0,93$) et azote total ($r = 0,83$) des sols. Ces résultats révèlent un effet des systèmes de culture sur les teneurs en carbone et azote minéralisables des sols. Ce qui pourrait affecter la disponibilité des éléments nutritifs, l'azote minéral en particulier, dans ces systèmes de culture où les plantes doivent se nourrir à partir des réserves du sol.

Mais au champ, la minéralisation de l'azote dans les sols dépend des conditions pédoclimatiques, en particulier de l'humidité du sol au cours du cycle cultural.

Nous avons étudié pendant deux cycles culturaux (1989 et 1990) l'évolution des teneurs en azote minéral dans les différentes parcelles concernées. En raison de la très grande variation intra-saisonnière et inter-saisonnière des facteurs pédoclimatiques influençant la minéralisation de l'azote au champ, un suivi de 2 années s'avère insuffisant. Cependant les résultats montrent une tendance bien nette indiquant que la variation des teneurs en azote minéral des sols passe par quatre phases bien distinctes qui peuvent être mises en relation avec l'évolution de l'humidité du sol.

En début de saison (fin mai/juin), les premières pluies déclenchent la minéralisation de l'azote qui reste cependant modérée, peut-être en raison de la période sèche qui suit généralement les premières pluies ; les teneurs en azote minéral restent constantes ou diminuent jusqu'à la reprise des pluies en début juillet (**première phase**). Ensuite, l'azote minéral augmente et atteint, deux à trois semaines après l'installation effective de la saison, un niveau maximum (**deuxième phase**). Ce pic de minéralisation est suivi par une chute brutale (une à deux semaines après le pic) des teneurs en azote minéral (**troisième phase**). Puis à partir de ce moment, les teneurs en azote minéral deviennent faibles et peu variables durant le reste de la saison, alors que les besoins azotés des plantes sont maximaux (**quatrième phase**). Cette variation des teneurs en azote minéral, dont le sens n'est pas modifié par les systèmes de culture, s'explique à la fois par l'activité biologique et sa variation au cours de la saison, les conditions pédoclimatiques et par la croissance et le développement des plantes. Elle semble montrer que l'évolution des teneurs en azote minéral du sol revêt un caractère saisonnier.

Par rapport à la croissance et au développement des plantes, l'évolution de l'azote minéral révèle un décalage entre la période où les teneurs en azote minéral sont

élevées (2^{ème} et 3^{ème} phase) et le moment où les besoins azotés des cultures sont grands (4^{ème} phase). Une fumure minérale azotée au cours de la quatrième phase pourrait être utilisée avec efficacité.

Au cours de la saison, l'azote nitrique est prédominant par rapport à l'azote ammoniacal montrant ainsi que les sols sont convenablement aérés. Mais dans le bas-fond, cette dynamique peut être affectée pendant les périodes d'excès d'eau intervenant au cours de la saison, en année pluvieuse. Cela se traduit par une prédominance de l'azote NH_4^+ surtout en présence d'apports organiques et par une diminution des teneurs en azote NO_3^- . Une étude conduite en laboratoire montre que la baisse des teneurs en NO_3^- est proportionnelle à la durée de la submersion (22 % en une semaine à 88 % en quatre semaines) et cesse dès la disparition de l'excès d'eau.

Les quantités d'azote minéral montrent des différences entre les trois sols (bas-fond > bas de pente > mi-pente) d'une part et entre les systèmes de culture pour chaque sol d'autre part. Tous systèmes de culture confondus, les teneurs en azote minéral sont étroitement liées aux teneurs en argile + limons ($r = 0,86$) et aux teneurs en matière organique ($r = 0,76$). Malgré ces différences entre les systèmes de culture, les niveaux d'azote minéral, à l'exception de la période du pic de minéralisation (2 et 3^{ème} phases), sont faibles. Dans ces agrosystèmes où la fumure minérale est quasi inexistante, toute amélioration de la nutrition des plantes passe par un relèvement du niveau organique des sols.

Les effets des amendements organiques disponibles dans la région (poudrette de fumier et paille de mil), sur la dynamique à court terme de la matière organique (carbone organique et azote totaux) et l'azote minéral, ont été étudiés dans les conditions pédoclimatiques de mi-pente et de bas-fond, pendant les saisons des pluies de 1989 et 1990.

En l'absence de plante et de tout apport organique, la décomposition *in situ* de la matière organique (carbone organique et azote totaux) est faible. Cela s'explique par le fait que la plus grande partie de la matière organique de ces sols, cultivés sans restitution organique (68 et 80 % pour le carbone organique total et 71 et 96 % pour l'azote total), se trouve dans la fraction argilo-limoneuse qui est relativement stable. Cependant, les pertes en matière organique, proportionnelles aux teneurs en carbone organique et azote totaux, sont plus élevées dans le sol argilo-limoneux de bas-fond (18,5 et 19 %) que dans le sol sableux de mi-pente. Cette différence s'explique par le fait que le sol de bas-fond a gardé plus longtemps, après la saison de 1989 qui a été plus pluvieuse, des conditions d'humidité favorable à l'activité biologique, contrairement au sol de mi-pente qui s'est desséché assez rapidement.

Dans les traitements avec la poudrette de fumier et la paille de mil, la décomposition est rapide et décroît du sol de mi-pente (68,5 à 73 % pour le carbone organique total et 29,2 à 36,6 % pour l'azote total) au sol de bas-fond (56,5 à 58,3 % pour le carbone organique total et 21 à 25 % pour l'azote total). Plus de la moitié des pertes en carbone organique total intervient dès la première saison pluvieuse après l'enfouissement. On sait que la texture sableuse favorise la décomposition de la matière organique incorporée en maintenant de bonnes conditions d'aération par rapport à la texture argileuse qui, en plus, a un effet protecteur contre le biodégradation. Mais quel que soit le sol, la décomposition de la paille de mil broyée à 2 mm est relativement plus rapide que celle de la poudrette de fumier. Ceci peut être attribué à un effet du broyage mais aussi à la nature de la paille de mil qui contient plus de composés fermentescibles que la poudrette de fumier.

Malgré cette rapide décomposition, l'incorporation de la poudrette de fumier ou de la paille de mil permet une augmentation des stocks organiques et surtout azotés des sols. Dans les sols sableux de mi-pente et argilo-limoneux de bas-fond, l'apport localisé d'un équivalent de 50 tonnes/ha entraîne, après deux saisons de pluies, une augmentation de 23 à 25 % des teneurs en carbone organique total et de 38 à 46 % des teneurs en azote total du sol amendé. Plus de la moitié des gains en carbone organique total se trouve encore dans la fraction 2000-50 μm dont la décomposition est plus rapide. Mais l'azote total tend à s'accumuler dans la fraction fine par les processus de minéralisation-réorganisation.

Concernant la minéralisation nette de l'azote, l'apport de la poudrette de fumier et de la paille de mil permet dès la première année une augmentation des teneurs en azote minéral. Cet effet est 2 à 3 fois plus élevé par rapport au témoin dans le sol sableux et beaucoup moins dans le sol de bas-fond, sauf pendant les périodes d'excès d'eau où une forte ammonification se produit. L'amendement organique a aussi un effet positif bien marqué pendant la deuxième année. On observe cependant, de façon plus marquée dans le sol de bas-fond, un effet dépressif des apports sur la minéralisation nette durant les 2 à 3 premières semaines.

L'ensemble des résultats montre que **l'amélioration et le maintien de la fertilité chimique et biologique des sols passe par un relèvement de leur niveau organique**. Les stratégies à mettre en oeuvre, à cet effet, devraient tenir compte d'une part de la faiblesse et de la mauvaise répartition des pluies et d'autre part de la rapide décomposition de la matière organique incorporée au sol. Les actions à entreprendre doivent donc tendre vers une bonne gestion de l'eau pluviale et une augmentation des restitutions organiques au sol.

La gestion de l'eau passe par différents aménagements limitant les ruissellements au profit de l'infiltration. Les diguettes antiérosives en cordons pierreux peuvent augmenter l'infiltration de 40 % (SERPANTIE et LAMACHERE, 1988). Pour les sols plus cohérents, la pratique du *zai*, qui consiste à creuser des trous de 40 à 80 cm de diamètre et de 10 cm de profondeur servant de lit de semis, peut y être associée. La pratique traditionnelle du *zai* pourrait tendre, avec efficacité, vers une forme de sous-solage avec des outils dents à traction animale (DUGUE, 1989 et ROOSE *et al.*, 1992). Mais une très forte infiltration risque d'entraîner un appauvrissement des horizons de surface des sols conduisant à une lixiviation des éléments minéraux. Nous avons montré que le début de la saison pluvieuse s'accompagnait d'une forte minéralisation nette de l'azote susceptible d'être lixivié. Il s'avère donc nécessaire d'associer aux différentes techniques d'économie d'eau, une fumure organique et/ou minérale.

Pour la fumure organique, rappelons que, dans le milieu étudié, la matière organique incorporée se décompose relativement vite. Ce qui entraîne que toute amélioration du niveau organique du sol exige des apports importants. Cela suppose une plus grande disponibilité de la biomasse, transformée (fumier, compost) ou non. Or d'une façon générale, la production végétale est limitée par les facteurs pédo-climatiques. Dans une zone comparable, au Sénégal, GANRY *et al.* (1983) estiment la production de résidus végétaux à 1,5 à 3 tonnes de matière sèche par hectare. Il s'avère donc nécessaire de chercher à accroître la production végétale. Ceci n'est possible que si l'agriculture concentre ses moyens de production (travail et fumure organique) sur des superficies limitées, comme cela a été montré dans le cas du parcage du bétail. Les bas-fonds, offrent plus de possibilités d'intensification en raison de leur régime hydrique et de la richesse relative de leurs sols. Mais ils sont encore peu ou pas connus sur le plan agronomique (maîtrise de l'eau et de l'enherbement, fertilisation, etc...).

Malgré la faiblesse de la production, une grande partie des résidus de récolte ne retourne pas au sol. En effet les résidus sont aussi utilisés pour les besoins domestiques et surtout par les animaux dont on ne maîtrise pas la production de fumier. Des efforts sont donc à faire pour récupérer ce fumier au profit des champs. Nous avons montré que le parcage des animaux est particulièrement efficace. Cela suppose une parfaite association entre agriculture et élevage. Mais celle-ci ne peut permettre de toute façon que de fumer des espaces limités et implique un transfert de fertilité à l'échelle du terroir.

Un autre moyen d'enrichir les sols en matière organique est la rotation culturale. Les résultats montrent que seule la jachère de longue durée a un effet favorable sur le niveau organique des sols. Mais une rotation culture/jachère de longue durée n'est plus possible dans cette zone en raison de la faible disponibilité des terres agricoles. Par ailleurs, la réduction de l'éventail des cultures constitue aussi une contrainte pour la

mise en place d'une rotation culturale. Seule la recherche d'un assolement par une rotation culture/plantes fourragères permettra de ralentir la dégradation des sols (LEMAITRE, 1949). Il faut pour cela trouver des espèces fourragères couvrantes ayant une croissance rapide. L'amélioration du niveau organique du sol se fera par l'effet combiné du parcage des animaux (déjections) et de la végétation (enracinement). Mais cela suppose une bonne symbiose entre agriculture et élevage dont nous avons déjà parlé plus haut.

Dans cette zone agropastorale, l'association effective de l'agriculture et de l'élevage doit tendre vers un cadre plus global de lutte contre la dégradation des sols où l'arbre jouera un rôle important. La recherche d'une gestion différenciée de l'espace agricole en fonction des situations morphopédologiques et des distances par rapport aux villages s'avère indispensable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMATO (M.), JACKSON (R.B.), BUTLER (J.H.A.) and LADD J.N.), 1984.** - Decomposition Of Plant Material In Australian Soils. II. Residual Organic ^{14}C And ^{15}N From Legume Plant Parts Decomposing Under Field And Laboratory. *Aust. J. Soil Res.*, 22, 331-341.
- AZAM (F.), HAIDER (K.) and MALIK (K.A.), 1985.** - Transformation of ^{14}C labelled plant components in soil in relation to immobilization and remineralization of ^{15}N fertilizer. *Plant and Soil* 86, 15-25.
- BACHELIER (G.), 1968.** - Contribution à l'étude de la minéralisation du carbone des sols. Mémoires ORSTOM, n° 30, 145 p.
- BACHELIER (G.), 1973.** - Activité biologique des sols et techniques qui en permettent l'évaluation. *Cah. O.R.S.T.O.M, Sér. Pédol.*, vol. XI, n° 1, 65-77.
- BALESDENT (J.), WAGNER (G.H.) and MARIOTTI (A.), 1988.** - Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 118-124.
- BERNHARD-RESERSAT (F.), 1981.** - Participation of light and organo-minéral fractions of soil organic matter in nitrogen mineralization in a sahelian savanna soil. *Zbl.Bakt, II Abt.*, 136, 281-290.
- BERNHARD-REVERSAT (F.), 1977.** - Observations sur la minéralisation in situ de l'azote du sol en savane sahélienne (Sénégal). *Cah. O.R.S.T.O.M, Sér. Biol.*, vol. XII, n° 4, 301-306.
- BILLAZ (R.) et DIAWARA (Y.), 1983.** Actions de développement et sociétés rurales. Tome I. Collection Développement Régional et Planification. I-n° 1, 191 p. Ed. IPD-AOF.
- BIRCH (H.F.), 1960.** - Nitrification in soils after different periods of dryness. *Plant and Soil*, 12, 81-96.
- BLONDEL (D.), 1971a.** - 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.
- BLONDEL (D.), 1971b.** - Rôle de la plante dans l'orientation de la dynamique de l'azote en sol sableux. *L'Agron. Trop.*, vol. XXVI, n° 12, 1362-1371.
- BLONDEL (D), 1971 c.** - Rôle de la matière organique libre dans la minéralisation en sol sableux ; relation avec l'alimentation azotée du mil. *L'Agron. Trop.*, vol. XXVI, n°12, 1372-1377.
- BOIFFIN (J.), KELI-ZAGHALI (J.) et SEBILLOTTE (M.), 1989.** - Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : un essai d'application du model de Henin et Dupuis. Fertilité et Système de production. Ed. INRA, 235-258.

- BONDE (T.A.) and ROSSWALL (T.), 1987.** - Seasonal Variation of Potential Mineralizable Nitrogen in Four Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 51, 1508-1514.
- BOULET (R.), 1968.** - Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre-Nord. *Rapport ORSTOM Dakar Hann*, 349 p.
- BOWMAN (R.A.), REEDER (J.D.) and LOBER (R.W.), 1990.** - Changes in soil properties in a Central Plains Rangeland soil after 3, 20 and 60 years of cultivation. *Soil Science*, vol. 150, n° 6, 851-857.
- 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 on Tropical Soils. Londres, 8 - 12 juin.* Ed. ORSTOM 175 p.
- BREMNER (J.M.), 1965.** - Inorganic forms of nitrogen. In: *Methods of Soil Analysis, Part II*, ed. by C.A. BLACK et al., American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1179-1232..
- BREMNER (J.M.) and WARING (S.A.), 1964.** - Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, n° 4922, February 29, 951-952.
- BRUCKERT (S.) et KILBERTUS (G.), 1980.** - Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux de sols bruns et de chernozems. *Plant and Soil*, 12, 81-96.
- BUNASOLS, 1987.** - Méthodes d'analyse physique et chimique des sols, eaux et plantes. Documentations techniques n° 3, 159 p.
- BURKE (J.C.), YONKER (C.M.), PARTON (W.J.), COLE (C.V.) and FLACH (K.), 1989.** - Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. Grassland soils. *Soil Sci. Am. J.*, vol. 53, 800-805.
- CAMERON (R.S.) and POSNER (A.M.), 1979.** - Mineralisable organic nitrogen in soil fractionated according to particle size. *J. Soil Sci.*, 30, 565-577.
- CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1988.** - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Rapport CEE/O.R.S.T.O.M.*, 202 p.
- CATROUX (G.), CHAUSSOD (R.) et NICOLARDOT (B.), 1987.** - Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 73 (3), 71-80.
- CHARREAU (C.) et NICOU (R.), 1971.** - L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. 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. - Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par les cultures annuelles. *L'Agron. Trop.*, vol. XXVII, 905-929.
- CHOPART (J.L.) et NICOU (R.), 1989. - Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. *L'Agronomie Tropicale* 44 (4), 269-281.
- CHRISTENSEN (B.T.), 1986a. - Wheat and barley straw decomposition under field conditions : Effet of soil type and plant cover on weight loss, nitrogen and potassium content. *Soil Biol. Biochem.*, vol. 17, n° 5, 691-697.
- CHRISTENSEN (B.T.), 1986b. - Barley straw decomposition under field conditions : effet of placement and initial nitrogen content on weight loss and nitrogen dynamics. *Soil Biol. Biochem.* vol. 18, N° 5, 523-529.
- CHRISTENSEN (B.T.) and SORENSEN (L.H.), 1986. - Nitrogen in particle size fractions of soils incubated for five years with ¹⁵N-ammonium and ¹⁴C-hemicellulose. *Journal of Soil Science*, 37, 241-247.
- CRASWELL (E.T.), 1978. - Some factors influencing denitrification and nitrogen immobilization in a clay soil. *Soil Biol. Biochem.* vol. 10, 241-245.
- DABIN (B.), 1967. - Application des dosages automatiques à l'analyse de des sols. Partie III. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér: Pédol.*, V(3), 257-286.
- DALAL (R.C.) and MAYER (R.J.), 1986a. - Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. I. Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. *Aust. J. Soil Res.*, 24, 265-279.
- DALAL (R.C.) and MAYER (R.J.), 1986b. - 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.
- DE BRUIN (B.), PENNING DE VRIES (F.W.T.), VAN BROEKHOVEN (L.W.), VERTREGT (N.) and VAN DE GEIJN (S.C.), 1989. - Net nitrogen mineralization, nitrification and CO₂ production in alternating moisture conditions in an unfertilized low-humus sandy soil from the Sahel. *Plant and Soil*, 113, 69-78.
- DE RIDDER (N.) & van KEULEN (H.), 1990. - Some aspects of the organic matter in sustainable intensified arable farming systems in the West-African semi-arid-tropics (SAT). *Fertilizer Research*, 26, 299-310
- DE RIDDER (N.), STROOSNIJDER (L.) et CISSE (L.), 1982. - La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation des ressources naturelles. Textes du cours PPS, tome 1, Théorie, Université Agronomique Wageningen, 237 p.

- DELAUNE (M.), REIFFSTECK (M.) et FELLER (C.), 1991.** - L'analyse granulométrique de sols et sédiments à l'aide du microgranulomètre "Sedigraph 5000 ET". Comparaison avec la méthode "pipette Robinson". *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, à paraître.
- DELPHIN (J.E.), 1986.** - Evaluation du pouvoir minéralisateur des sols agricoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. *Agronomie* 6 (5), 453-458.
- DELPHIN (J.) et TIQUET (J.L.), 1989.** - Appréciation, par l'analyse de terre, de l'aptitude à la minéralisation des sols de la plaine d'Alsace. in: *Fertilité et Systèmes de Production*. Ed. INRA, 168-178.
- DELPHIN (J.E.), CHAPOT (J.Y.) et SCHOELLEN (A.), 1992.** - Relations entre le pouvoir minéralisateur des sols et la minéralisation nette de l'azote au champ. *Agronomie* 11, 439-445.
- DICK (W.A.), 1983.** - Organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. *Soil Sci. Am. J.*, vol. 47, 102-107.
- DJEGUI (N.), 1992.** - Influence des systèmes de culture sur le statut organique (particulièrement sur la dynamique de l'azote) des sols sur terre de Barre au Sud Bénin. Thèse de doctorat ENSA Toulouse, 190 p.
- DOMMERGUES (Y.) et MANGENOT (F.), 1970.** - Ecologie microbienne du sol. Ed. Masson & Cie. 796 p.
- DROUINEAU (G.) et LEFEVRE (G.), 1949.** - Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. Agron.*, 19, 518-536.
- DUGUE (P.), 1989.** - Possibilités et limites de l'intensification des systèmes de culture vivriers en zone soudan-sahélienne. Le cas du Yatenga (Burkina Faso). Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier (ENSAM), 269 p.
- DUIVENBOODEN (N. van) et CISSE (L.), 1989.** - Etude de la décomposition et de l'évolution des taux de carbone, d'azote et de phosphore de la matière organique apportée au sol. CABO Rapport n° 117, 29-36.
- FAO, 1975.** - Perspectives du développement agricole à long terme de la Haute-Volta. Rapport FAO, 157 p.
- FAO, 1986.** - Annuaire de la production, vol. 40, édit. FAO.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (Cl.) et THOMANN (Ch.), 1969.** - Bilans de l'évolution des sol de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. *Agronomie Tropicale*, 3, 263-301.

- FELLER (C.) et MILLEVILLE (P.), 1976.** - Evolution des sols de défriche récente dans la région des terres neuves (Sénégal oriental). 1 ère partie : Présentation de l'étude et de l'évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. Rapport ORSTOMDakar, 26 p.
- FELLER (C.) et MILLEVILLE (P.), 1977.** - Evolution des sols de défriche récente dans la région des terres neuves (Sénégal oriental). 2 ème partie : Aspects biologiques et caractéristiques de la matière organique. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, vol. XV, n° 3, 292-302.
- FELLER (C.), 1979.** - Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols : application aux sols tropicaux, à textures grossières, très pauvres en humus. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. XVII, N°4, 339-346.
- FELLER (C.), GANRY (F.) et CHEVAL (M.), 1981.** - Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. I. Influence d'une fertilisation azotée (urée) et d'un amendement organique (compost) sur la répartition du carbone et de l'azote dans différents compartiments d'un sol sableux. *L'Agron. Trop.*, 36 (1), 9-17.
- FELLER (C.), GANRY (F.) et CHEVAL (M.), 1981.** - Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. II. Décomposition de résidus végétaux (compost) pendant une saison des pluies dans un sol sableux. *L'Agron. Trop.*, 36 (1), 18-25.
- FELLER (C.) et GANRY (F.), 1982.** - Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. III. Effet du compostage et de l'enfouissement de divers résidus de récolte sur la répartition de la matière organique dans différents compartiments d'un sol sableux. *L'Agron. Trop.*, 37 (3), 262-269.
- FELLER (C.), BERNHARD-REVERSAT (F.), GARCIA (J.L.), PANTIER (J.J.), ROUSSOS (S.) et VAN VLIET-LANOE (B.), 1983.** - Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques d'un sols sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost). *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. XX, n° 3, 223-238.
- FELLER (C.), CHOPART (J.L.) et DANCETTE, 1987.** - Effet de divers modes de restitution de pailles de mil sur le niveau et la nature du stock organique dans deux sableux tropicaux (Sénégal). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XXIII, n° 3, 237-252.
- FELLER (C.), FRANCOIS (C.), VILLEMEN (G.), PORTAL (J.M.), TOUTAIN (F.) et MOREL (J.L.), 1991a.** - Nature des matières associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *C.R.Acad.Sc.Paris, t.312, Série II*, 1491-1497.
- FELLER (C.), FRITSCH (E.), POSS (R.) et 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. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. XXVI, N° 1, 25-36.

- FRANCOIS (C), 1988. - Devenir à court terme de différentes formes d'azote (urée, végétaux, sol) dans un ferrisol (Martinique). Caractérisation de N-organique par fractionnement granulométrique. Etude avec ^{15}N . Thèse Doctorat, Université Nancy I, 135 p + Annexes.
- GANRY (C.), 1975. - Importance des enfouissements de matière organique dans l'amélioration des systèmes culturaux au Sénégal. Bambey, CNRA, 46 p.
- GANRY (F) et 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 Bulletin* 47, 37-54.
- GANRY (F.), 1990. - Application de la méthode isotopique à l'étude de bilans azotés en zone tropicale sèche. Th. Université Nancy I, 355 p.
- GEIGER (S.C.), MANU (A.) and 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. - Dynamique de l'azote minéral en sol nu ou cultivé de région tropicale sèche du nord-Cameroun. Thèse Docteur-Ingénieur, Univ. Sci. Tech. Languedoc, 171 p.
- GIROUX (M.) et SEN TRAN (T.), 1987. - Comparaison de différentes méthodes d'analyse de l'azote du sol en relation avec sa disponibilité pour les plantes. *Can. J. Soil Sci.* 67, 521-531.
- GODEFROY (J.), 1974. - Evolution de la matière organique du sol sous culture de bananier et de l'anas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique. Thèse Docteur-Ingénieur. Univ. Nancy I, 166 p.
- GREENLAND (D.J.), 1958. - Nitrate fluctuations in tropical soils. *J. Agr. Sci.*, 50, 82-92.
- GUILLET (F.), 1991. - Etude et modélisation hydro-pédologique d'un bassin versant de la zone sahélo-soudanaise au Burkina Faso (Utilisation du modèle "SOURCE"). Thèse de Doctorat, Université Paris VI. 266 p + Annexes.
- GUINKO (S.), 1985. - Contribution à l'étude de la végétation et de la flore du Burkina Faso (ex Haute-Volta). I. Les territoires phytogéographiques. *Bulletin de l'I.F.A.N.*, T. 26, Sér. A, n° 12, 129-139.
- HENIN (S.) et DUPUIS (M.), 1945. - Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.*, XV, 17-29.
- HENIN (S.), GRAS (R.) et MONNIER (G.), 1969. - Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Masson et Cie, 2^{ème} édition, Paris, 329 p.
- INUBUSHI (K), WADA (H) and TAKAI (Y), 1984. - Easily decomposable organic matter in paddy soil. VI. Kinetics of Nitrogen Mineralization in Submerged Soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 31 (4), 563-572.

- JAMES (P.M.) and KONRAD (H.)**, 1986. - Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. *Soil Science Society of America*, n° 17, 283-302.
- JENKINSON (D.S.)**, 1975. - The turnover of organic matter in agricultural soils: in : *Welsh Soils Discussion Group Report (Aberystwyth)*, 16, 91-105.
- JENKINSON (D.S.)**, 1977. - Studies on the decomposition of plant material in soil. IV. The effect of rate addition. *Journal of Soil Science*, 28, 417-423.
- JENKINSON (D.S.) and AYANABA (A.)**, 1977. - Decomposition of carbon-14 Labeled Plant Material Under Tropical Conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 41, 912-915.
- KAWAGUCHI (S), KAI (H) and AIBE (T)**, 1986. - Nitrogen Dynamics in Soils Following the Addition of ¹⁵N-Labelled Rice Straw. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, 30 (4), 247-252
- LADD (J.N.), AMATO (M.) and 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.
- LADD (J.N.), OADES (J.M.) and AMATO (M.)**, 1981. - Microbial biomass formed from ¹⁴C, ¹⁵N-labelled plant material decomposing in soils in the field. *Soil Biol. Biochem.*, vol. 13, 119-126.
- LEMAITRE (Ch.)**, 1949. - Moyens propres à parer l'usure des sols dans l'est du territoire du Niger (cercles de Gouré et de Nguigmi). *Bull. Agricole du Congo Belge*, vol. XL, n° 2, 1439-1518.
- MAGDOFF (F.R.)**, 1991. - Field nitrogen dynamics : Implications for assessing N availability. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 22 (15 & 16), 1507-1517.
- MARCHAL (J.Y.)**, 1975. - Evolution des systèmes agraires : l'exemple du Yatenga. *Séminaire sur la Planification Agricole et la Population. Tanger 3-15 nov.*
- MARCHAL (J.Y.)**, 1977. - Système agraire et évolution de l'occupation de l'espace au Yatenga (Haute-Volta). *Cah. ORSTOM, Sér. Sci. Hum.*, vol. XIV, n° 2, 141-149.
- MARCHAL (J.Y.)**, 1983. - Yatenga nord Haute-Volta. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. *Travaux et Documents de l'ORSTOM n° 167 P*, 849 p.
- MARION (G.M.), KUMMEROW (J.) and MILLER (P.C.)**, 1981. - Predicting nitrogen mineralization in Chaparral soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 956-961.

- MARTIN (A.), MARIOTTI (A.), BALESSENT (J.), LAVELLE (P.) and VUATTOUX (R.), 1990. - Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by ^{13}C natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.*, 22, 517-523.
- MARY (B.) et 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.
- MERSADIER (G.), 1986. - Histoire et organisation territoriale d'un village du Yatenga. ORSTOM *multigr.*, 29 p.
- MILLEVILLE (P.), 1982. - Etude d'un système de production agro-pastoral sahélien de la Haute-Volta. 1 ère partie : Le système de culture. Rapport ORSTOM Ouagadougou, 66 p.
- MOREAU (R.), 1984. - Etude sur parcelles comparatives de l'évolution des sols ferrallitiques sous différents modes de mise en culture en zones forestière et préforestière de Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. XXI, n° 1, 43-56.
- MOREAU (R.), 1986. - Effect of the method of deforestation and soil management on properties of some soils in Ivory Coast. in : "*Land and Development in the Tropics*". R. LAL, P.A. SANCHEZ and R.W. CUMMINGS, JR (eds), 247-264.
- MOREL (R.), 1989. - Les sols cultivés. Technique et Documentation. *Edition LAVOISIER*. 373 p.
- MOUREAUX (C.), 1967. - Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols ouest-africains. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. V, n°4, 393-420.
- NICOLARDOT (B.) et CHAUSSOD (R.), 1986. - Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés. III. Approche cinétique et estimation simplifiée de l'azote facilement minéralisable. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, 23 (3), 233-247.
- PALLO (F.), 1982. - Comparaison des caractères physico-chimiques et de la matière organique de trois pédon cultivés et vierges situés entre Fada N'gourma et Piéga (Haute-Volta). Thèse Doctorat, Université Aix-Marseille III, 175 p + Annexes.
- PATRICK (W.H.) and GOTOH (S.), 1974. - The role of oxygen in nitrogen loss from flooded soils. *Soil Sci.*, 118, 78-81.
- PATRICK (W.H.), 1982. - Nitrogen Transformations in Submerged Soils. in : "*Nitrogen in Agricultural Soils*" - Agronomy N° 22, 449-465.
- PENNOCK (D.J.), van KESSEL (C.), FARRELL (R.E.), and SUTHERLAND (R.A.), 1992. - Landscape-Scale Variation in Denitrification. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 770-776.

- PICHOT (J.), BURDIN (S.), CHAROY (J.) et NABOS (J.), 1974.** - L'enfouissement des pailles de mil *Pennisetum* dans les sols sableux dunaires. Son influence sur les rendements et la nutrition minérale du mil. Son action sur les caractéristiques chimiques du sol et la dynamique de l'azote minéral. *L'Agron. Trop.* pp.
- PICHOT, 1975.** - Rôle de la matière organique dans la fertilité du sol. *Agronomie Tropicale*, 30 (2), 170-175.
- PICHOT (J.), SEDOGO (M.P.), POULAIN (J.F.) et ARRIVETS (J.), 1981.** - Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. *Agron. Trop.*, 36 (2), 122-133.
- PIERI (C.), 1985.** - Fertilisation des cultures vivrières et fertilité des sols en agriculture paysanne sub-shaarienne. L'expérience de l'IRAT. in : "*Technologies Appropriées pour les Paysans des Zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest*". Université de Purdue, 85-126.
- PIERI (C.), 1989.** - Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la coopération-IRAT/CIRAD, 444 p.
- PONNAMPERUMA (F.N.), 1972.** - The chemistry of submerged soils. in : *Advances in Agronomy*, N° 24, 29-96.
- POSS (R.), 1991.** - Transfert de l'eau et des minéraux dans les terres de Barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse Doctorat, Université Paris VI, 335 p.
- RAGHUBANSHI (A.S.), 1991.** - Effet of topogaphy on selected soil properties and nitrogen mineralization in a dry tropical forest. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 24, N° 2, 145-150.
- REDDY (K.R.) and PATRICK (W.H.), 1975.** - Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition and nitrogen loss in a flooded soil. *Soil Biol. Biochem.*, vol. 7, 87-94.
- ROCHESTER (I.J.), CONSTABLE (G.A.) and MacLEOD (D.A.), 1991.** - Mineral nitrogen dynamics in a fallow grey clay. *Austalian Journal of Experimental Agriculture*, 31, 237-244.
- ROOSE (E.), 1981.** - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. *Travaux et Documents de l'ORSTOM* n° 130, 566 p.
- ROOSE (E.), 1984.** - Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux. L'Erosion en Zone Tropicale. Réunion Technique 55 ème SIMA, 24-36.

- ROOSE (E.), 1986. - Problèmes posés par l'aménagement des terroirs en zone soudano-sahélienne d'Afrique Occidentale. Aménagements Hydro-agricoles et Systèmes de Productions CIRAD-DSA n° 6.
- ROOSE (E.), DUGUE (P.) et RODRIGUEZ (L.), 1992. - La G.C.E.S. Une nouvelle stratégie de lutte anti-érosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, n° 233, 49-63.
- SANCHEZ (P.A.), 1976. - Properties and management of soils in the tropics. John Wiley and Sons. 618 p.
- SANCHEZ (P.A.), PALM (C.A.), SZOTT (L.T.), CUEVAS (E.), and LAL (R.), 1989. - Organic input management in tropical agroecosystems. in: *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. COLEMAN (D.), OADES (J.M.) and UEHARA (G.) Editions. 125-152.
- SCHIMEL (D.S.) and PARTON (W.J.), 1986. - Microclimatic controls of nitrogen mineralization and nitrification in shortgrass steppe soils. *Plant and Soil* 93, 347-357.
- SEBILLOTTE (M.), 1982. - Les systèmes de culture. Réflexion sur l'intérêt et l'emploi de cette notion à partir de l'expérience acquise en région de grande culture. In: *Séminaire du département d'Agronomie de l'INRA*, Vichy, doc. multigr., 63-80.
- SEDOGO (M.P.), 1981. - Contribution à la valorisation des résidus cultureux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride (Matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse de Docteur-Ingénieur, Institut Polytechnique de Lorraine, Nancy, 195 p.
- SERPANTIE (G.) et LAMACHERE (J.M.), 1988. - Valorisation agricole des eaux de ruissellement en zone soudano-sahélienne. Burkina Faso Province du Yatenga Région de Bidi. ORSTOMOuagadougou.
- SERPANTIE (G.), VALENTIN (C.) et TEZENAS DU MONTSSEL (L.), 1988. - Dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral subsahélien sous aridification : conséquence pour les systèmes de production. ORSTOMOuagadougou, multigr. 29 p.
- SERPANTIE (G.), TEZENAS DU MONTSSEL (L.) et VALENTIN (C.), 1992. - La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions. *L'aridité une contrainte au développement*. Didactiques/ ORSTOMEditions 1992, 420-447.
- 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 rouge de Casamance. *Agron. Trop.*, 29 (12), 1228-1248.

- SOLLINS (P), SPYCHER (G.) and GLASSMAN (C.A.), 1984.** - Net nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction forest soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, vol. 16, n° 1, 31-37.
- SOME (L.), 1989.** - Diagnostic agropédologique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. Thèse Doctorat, Université Montpellier II, 312 p.
- SORENSEN (L.H.), 1980.** - Carbon-Nitrogen relationships during the humification of cellulose in soils containing different amounts of clay. *Soil Biology & Biochemistry* 13, 313-321.
- SOUDI (B.) et CHIANG (C.N.), 1989.** - Minéralisation de l'azote dans les sols céréaliers des zones semi-arides du Maroc. Séminaire sur les sols céréaliers, Tiaret, octobre 1989, 25-37.
- SOURABIE (N.), 1979.** - Influence de la culture de la canne à sucre sur les sols de Bérégadougou (Haute-Volta). Cas particulier des facteurs de fertilité liés à la matière organique. Thèse Doctorat, Université Aix-Marseille III, 190 p.
- STAT-ITCF, 1989.** - Manuel d'utilisation. ITCF.
- STEVENSON (F.J.), 1965.** - Origin and Distribution of Nitrogen in Soil. In: *Soil Nitrogen Agronomy* n° 10. American Society of Agronomy, 1-42.
- VIAUX (Ph.), 1981.** - Conservation des échantillons de sol en vue d'un dosage de l'azote minéral. *Science du Sol "Bull. AFES"* N° 1, 73-88.
- VIZIER (J.F.), 1971.** - Etude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. IX, n° 4, 373-395.
- VIZIER (J.F.), 1990.** - Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau. Une démarche physico-chimique. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. XXV, n° 4, 431-442.
- WEERARATNA (C.S.), 1979.** - Pattern of nitrogen release during decomposition of some green manures in a tropical alluvial soil. *Plant and Soil*, 53, 287-294.

ANNEXES

ANNEXE III.1 : Teneurs en carbone organique et azote totaux et pH d'un sol ferrugineux peu lessivé de mi-pente en fonction des systèmes de culture (n = 3).

<i>systèmes de culture</i>	<i>profondeur (en cm)</i>	C total (en %)	N total (en ‰)	pH eau	pH KCl
MP1	0-10	0,42 ± 0,04	0,38 ± 0,05	6,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1
	10-30	0,31 ± 0,02	0,23 ± 0,01	5,5 ± 0,2	4,3 ± 0,2
	30-40	0,35 ± 0,02	0,26 ± 0,02	5,8 ± 0,3	4,5 ± 0,1
	40-60	0,22 ± 0,02	0,23 ± 0,01	5,9 ± 0,2	4,5 ± 0,2
MP2	0-10	0,22 ± 0,02	0,22 ± 0,01	5,8 ± 0,1	4,4 ± 0,3
	10-30	0,25 ± 0,01	0,20 ± 0,02	5,6 ± 0,2	4,1 ± 0,2
	30-40	0,21 ± 0,02	0,17 ± 0,02	5,7 ± 0,1	4,2 ± 0,1
	40-60	0,15 ± 0,01	0,14 ± 0,01	5,7 ± 0,1	4,3 ± 0,1
MP3	0-10	0,26 ± 0,01	0,23 ± 0,01	5,6 ± 0,1	4,4 ± 0,2
	10-30	0,29 ± 0,02	0,19 ± 0,02	5,4 ± 0,2	4,2 ± 0,1
	30-40	0,23 ± 0,01	0,17 ± 0,01	5,6 ± 0,1	4,3 ± 0,1
	40-60	0,18 ± 0,03	0,12 ± 0,01	5,7 ± 0,4	4,4 ± 0,1
PPAS 5 %		0,07	0,07	NS	
C.V. (%)		9,2	11,4	3,3	

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.
NS = Non significatif

ANNEXE III.1 (suite) : Teneurs en carbone et azote total et pH d'un sol ferrugineux lessivé de bas de pente en fonction des systèmes de culture (n = 3).

<i>systèmes de culture</i>	<i>profondeur (en cm)</i>	C total (en %)	N total (en ‰)	pH eau	pH KCl
BP1	0-10	0,30 ± 0,02	0,33 ± 0,06	6,1 ± 0,1	4,8 ± 0,1
	10-25	0,34 ± 0,02	0,26 ± 0,02	5,4 ± 0,1	4,1 ± 0,1
	25-35	0,27 ± 0,03	0,25 ± 0,01	5,4 ± 0,1	4,1 ± 0,1
	35-60	0,22 ± 0,02	0,20 ± 0,01	5,4 ± 0,1	4,0 ± 0,01
BP2	0-10	0,37 ± 0,01	0,32 ± 0,01	6,4 ± 0,1	5,3 ± 0,1
	10-25	0,34 ± 0,03	0,26 ± 0,01	5,7 ± 0,3	4,3 ± 0,3
	25-35	0,27 ± 0,01	0,26 ± 0,01	5,5 ± 0,1	4,1 ± 0,02
	35-60	0,25 ± 0,01	0,28 ± 0,01	5,5 ± 0,3	4,2 ± 0,2
BP3	0-10	0,52 ± 0,10	0,51 ± 0,14	7,2 ± 0,4	6,1 ± 0,7
	10-25	0,30 ± 0,02	0,30 ± 0,02	7,1 ± 0,6	5,8 ± 0,7
	25-35	0,26 ± 0,02	0,22 ± 0,01	6,6 ± 0,6	5,3 ± 0,1
	35-60	0,17 ± 0,03	0,20 ± 0,01	5,6 ± 0,4	4,3 ± 0,2
PPAS à 5 %		0,04	0,10	NS	
C.V. (%)		4	9	5	

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.

NS = Non significatif

ANNEXE III.1. (suite) : Teneurs en carbone et azote total et pH d'un sol hydromorphe à pseudogley peu humifère de bas-fond en fonction des systèmes de culture (n = 3).

<i>systèmes de culture</i>	<i>profondeur (en cm)</i>	C total (en %)	N total (en ‰)	pH eau	pH KCl
BF1	0-10	1,40 ± 0,16	1,26 ± 0,11	6,3 ± 0,1	5,5 ± 0,1
	10-35	1,25 ± 0,06	1,01 ± 0,01	6,2 ± 0,1	5,1 ± 0,1
	35-65	0,84 ± 0,07	0,71 ± 0,07	6,0 ± 0,1	4,8 ± 0,1
BF2	0-10	0,71 ± 0,10	0,66 ± 0,15	6,0 ± 0,1	4,8 ± 0,1
	10-35	0,73 ± 0,02	0,66 ± 0,04	5,8 ± 0,1	4,4 ± 0,01
	35-65	0,60 ± 0,02	0,46 ± 0,01	6,0 ± 0,1	4,6 ± 0,1
PPAS à 5 %		0,57	NS	NS	
C.V. (%)		15	15	1	

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.
NS = Non significatif

ANNEXE III.2 : Teneurs en bases échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol ferrugineux peu lessivé de mi-pente en fonction des systèmes de culture

Systèmes de culture	Profondeur (en cm)	Bases échangeables (en cmol.kg ⁻¹)				Phosphore	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Somme des bases (S)	total (en %)	assimilable (en mg/kg)
MP1	0-10	0,99 ± 0,14	0,43 ± 0,07	0,26 ± 0,01	1,68	0,18 ± 0,02	9,5 ± 1,25
	10-30	0,65 ± 0,08	0,32 ± 0,05	0,18 ± 0,02	1,15	0,18 ± 0,02	5,7 ± 1,25
	30-40	1,19 ± 0,40	0,65 ± 0,26	0,13 ± 0,02	1,97	0,20 ± 0,02	6,3 ± 0,94
	40-60	1,24 ± 0,08	1,08 ± 0,02	0,13 ± 0,01	2,58	0,26 ± 0,02	6,0 ± 2,0
MP2	0-10	0,65 ± 0,01	0,23 ± 0,02	0,22 ± 0,08	1,10	0,18 ± 0,01	12,0 ± 4,0
	10-30	0,65 ± 0,18	0,28 ± 0,08	0,23 ± 0,01	1,16	0,19 ± 0,01	8,0 ± 0,01
	30-40	1,01 ± 0,22	0,67 ± 0,23	0,08 ± 0,01	1,76	0,19 ± 0,01	7,3 ± 0,01
	40-60	1,03 ± 0,27	0,67 ± 0,23	0,06 ± 0,01	1,76	0,19 ± 0,01	5,0 ± 0,01
MP3	0-10	0,58 ± 0,07	0,30 ± 0,04	0,15 ± 0,01	1,03	0,17 ± 0,01	12,0 ± 4,0
	10-30	0,72 ± 0,23	0,39 ± 0,13	0,15 ± 0,05	1,26	0,17 ± 0,01	4,0 ± 0,01
	30-40	1,04 ± 0,09	0,55 ± 0,03	0,11 ± 0,01	1,70	0,20 ± 0,01	3,5 ± 0,01
	40-60	1,05 ± 0,03	0,80 ± 0,04	0,05 ± 0,01	1,90	0,21 ± 0,02	4,0 ± 0,01
PPAS à 5 %		NS	NS	NS		NS	
C.V. (%)		20	31	25		9	

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.
 NS = Non significatif

ANNEXE III.2 (suite) : Teneurs en bases échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol ferrugineux lessivé de bas de pente en fonction des systèmes de culture

Systèmes de culture	Profondeur (en cm)	Bases échangeables (en cmol.kg ⁻¹)				Phosphore	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Somme des bases (S)	total (en %)	assimilable (en mg/kg)
BP1	0-10	1,08 ± 0,02	0,35 ± 0,08	0,31 ± 0,01	1,74	0,23 ± 0,01	9,0 ± 0,20
	10-25	0,65 ± 0,09	0,31 ± 0,01	0,21 ± 0,01	1,17	0,22 ± 0,02	5,5 ± 0,01
	25-35	0,97 ± 0,01	0,72 ± 0,05	0,20 ± 0,01	1,89	0,27 ± 0,01	8,5 ± 1,50
	35-60	1,26 ± 0,01	0,92 ± 0,10	0,20 ± 0,02	2,38	0,29 ± 0,01	4,5 ± 0,01
BP2	0-10	0,89 ± 0,11	0,47 ± 0,02	0,55 ± 0,01	1,91	0,23 ± 0,01	12,5 ± 0,50
	10-25	0,58 ± 0,03	0,37 ± 0,06	0,44 ± 0,12	1,39	0,23 ± 0,01	7,5 ± 0,01
	25-35	0,70 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,24 ± 0,01	1,25	0,25 ± 0,01	5,0 ± 0,01
	35-60	1,68 ± 0,45	0,97 ± 0,29	0,17 ± 0,01	2,82	0,28 ± 0,03	5,0 ± 1,00
BP3	0-10	1,70 ± 0,23	0,76 ± 0,16	0,92 ± 0,38	3,38	0,38 ± 0,10	12,5 ± 0,50
	10-25	1,36 ± 0,09	0,74 ± 0,04	0,92 ± 0,41	3,02	0,25 ± 0,04	9,0 ± 1,00
	25-35	1,27 ± 0,18	0,62 ± 0,08	0,56 ± 0,04	2,45	0,23 ± 0,03	9,5 ± 1,50
	35-60	1,53 ± 0,24	0,87 ± 0,06	0,18 ± 0,21	2,58	0,26 ± 0,02	9,0 ± 1,00
PPAS 5 %		NS	NS	NS		NS	
C.V. (%)		25	28	38		20	

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.
NS = Non significatif

ANNEXE III.2 (suite): Teneurs en bases échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol hydromorphe de bas-fond en fonction des systèmes de culture

Systèmes de culture	Profondeur (en cm)	Bases échangeables (en cmol.kg ⁻¹)				Phosphore	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Somme des bases (S)	total (en %)	assimilable (en mg/kg)
BF1	0-10	4,16 ± 0,80	1,77 ± 0,46	0,75 ± 0,22	6,68	0,57 ± 0,08	35,5 ± 4,5
	10-35	3,1 ± 0,12	1,57 ± 0,01	0,55 ± 0,25	5,22	0,73 ± 0,08	44,0 ± 7,5
	35-60	2,26 ± 0,14	1,20 ± 0,04	0,47 ± 0,18	3,93	0,48 ± 0,08	26,0 ± 7,0
BF2	0-10	1,40 ± 0,20	0,96 ± 0,19	0,58 ± 0,01	2,94	0,44 ± 0,06	19,5 ± 3,5
	10-35	1,94 ± 0,10	0,97 ± 0,02	0,33 ± 0,05	3,24	0,49 ± 0,02	11,0 ± 3,0
	35-60	2,44 ± 0,27	1,05 ± 0,06	0,31 ± 0,06	3,80	0,44 ± 0,01	9,5 ± 2,5
PPAS à 5 %		NS	NS	NS		NS	
C.V. (%)		25	23	45		15	

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.

NS = Non significatif

ANNEXE X.1 : Teneurs et contenus en carbone total des fractions granulométriques du sol de mi-pente en fonction des traitements (8 et 505 JAI).

Traitements	Fractions taille en μm	Poids % de sol	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ctotal	C/N
8 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000-200	32,1	1,12	0,36	15,5	12,5
	200-50	54,0	0,73	0,38	16,3	
	<50	13,2	12,08	1,59	68,2	11,0
Poudrette de fumier	2000-200	32,1	24,8	7,97	65,2	21,6
	200-50	54,6	3,93	1,92	15,7	
	<50	12,4	18,52	2,34	19,1	13,4
Paille de mil	2000-200	33,6	17,3	5,84	61,5	26,4
	200-50	53,4	2,03	1,37	14,4	
	<50	12,5	18,33	2,29	24,1	13,8
505 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000-200	28,3	0,33	0,10	5,5	5,9
	200-50	57,0	0,28	0,16	8,9	
	<50	13,8	11,08	1,53	85,5	15,3
Poudrette de fumier	2000-200	32,0	2,4	0,85	17,4	13,7
	200-50	55,3	2,93	1,62	33,1	
	<50	13,0	18,55	2,42	49,5	8,6
Paille de mil	2000-200	29,7	1,93	0,57	14,8	21,2
	200-50	57,1	1,9	1,08	28,1	
	<50	13,2	16,7	2,20	57,1	8,2

ANNEXE X.1 : Teneurs et contenus carbone organique total des fractions granulométriques du sol bas-fond en fonction des traitements (8 et 505 JAI).

Traitements	Fractions taille en μm	Poids % de sol	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ctotal	C/N
8 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000-200	0,7	98,40	0,66	8,2	53,6
	200-50	24,8	3,85	0,93	11,6	
	<50	74,0	8,70	6,44	80,2	8,7
Poudrette de fumier	2000-200	2,6	285,30	7,58	38,9	28,2
	200-50	25,1	15,40	3,86	19,8	
	<50	70,6	11,40	8,03	41,2	10,4
Paille de mil	2000-200	3,2	310,60	10,02	51,6	36,0
	200-50	26,5	8,50	2,26	11,6	
	<50	68,7	10,40	7,12	36,7	8,9
505 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000-200	0,7	39,8	0,29	4,2	65,7
	200-50	27,5	3,7	1,02	14,7	
	<50	70,1	8,0	5,63	81,1	8,6
Poudrette de fumier	2000-200	0,9	77,9	0,74	7,7	14,9
	200-50	28,4	8,0	2,26	23,7	
	<50	68,4	9,6	6,56	68,6	8,6
Paille de mil	2000-200	1,0	68,9	0,67	7,5	20,1
	200-50	28,3	6,1	1,72	19,5	
	<50	67,9	9,5	6,45	73,0	9,0

ANNEXE X.2 : Teneurs et contenus en azote total des fractions granulométriques du sol bas-fond en fonction des traitements (8 et 505 JAI).

Traite-ments	Fractions taille en μm	Poids % de sol	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ntotal	C/N
8 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000/50	25,5	0,12	0,03	3,9	53,6
	50/0	74,0	1,0	0,74	96,1	8,7
Poudrette de fumier	2000/50	27,7	1,44	0,40	36,0	28,2
	50/0	70,6	1,0	0,71	64,0	10,4
Paille de mil	2000/50	29,7	1,14	0,34	35,5	36,0
	50/0	68,7	0,90	0,62	59,5	8,9
505 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000/50	28,2	0,07	0,02	3,0	65,7
	50/0	70,1	0,93	0,65	97,0	8,6
Poudrette de fumier	2000/50	29,3	0,68	0,20	21,0	14,9
	50/0	68,4	1,11	0,76	79,0	8,6
Paillé de mil	2000/50	29,3	0,41	0,12	14,5	20,1
	50/0	67,9	1,05	0,71	85,5	9,0

ANNEXE X.2 : Teneurs et contenus en azote total des fractions granulométriques du sol bas-fond en fonction des traitements (8 et 505 JAI).

Traite-ments	Fractions taille en μm	Poids % de sol	mg/g de fraction	mg/g de sol	% Ntotal	C/N
8 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000/50	25,5	0,12	0,03	3,9	53,6
	50/0	74,0	1,0	0,74	96,1	8,7
Poudrette de fumier	2000/50	27,7	1,44	0,40	36,0	28,2
	50/0	70,6	1,0	0,71	64,0	10,4
Paille de mil	2000/50	29,7	1,14	0,34	35,5	36,0
	50/0	68,7	0,90	0,62	59,5	8,9
505 jours après la mise en incubation						
Témoin	2000/50	28,2	0,07	0,02	3,0	65,7
	50/0	70,1	0,93	0,65	97,0	8,6
Poudrette de fumier	2000/50	29,3	0,68	0,20	21,0	14,9
	50/0	68,4	1,11	0,76	79,0	8,6
Paille de mil	2000/50	29,3	0,41	0,12	14,5	20,1
	50/0	67,9	1,05	0,71	85,5	9,0

ANNEXE XI.1 (suite) : comparaison des teneurs en azote minéral du sol argilo-limoneux de bas-fond dans les sacs incubés in situ (n = 4)

	Jours après incubation	8	15	21	28	50	60	75	95	365	372	380	410
NO ₃ ⁻	Témoin To	5,1	7,6	9,0	4,5	6,2	8,2	7,3	10,5	12,0	74,3	8,7	7,1
	Fumier Tf	9,7	5,6	6,1	5,7	8,9	6,0	3,3	9,2	31,3	78,2	9,2	7,2
	Paille Tp	9,3	7,0	4,9	6,5	11,2	6,1	3,3	6,4	36,4	87,2	10,3	9,1
	PPAS 5 %	2,9	NS	2,1	NS	2,3	0,4	2,4	1,2	9,7	NS	NS	NS
	C.V. (%)	18	30	16	22	13	3	27	7	19	8	31	27
NH ₄ ⁺	Témoin To	3,0	2,6	6,2	0,9	9,5	1,4	5,1	2,0	3,9	18,9	2,4	3,2
	Fumier Tf	21,3	3,0	6,3	2,8	17,8	3,4	9,4	4,8	5,1	20,5	5,7	2,5
	Paille Tp	13,8	3,0	6,8	6,5	17,5	3,2	11,3	3,3	4,1	20,7	4,8	6,0
	PPAS 5 %	2,3	NS	NS	1,8	4,5	0,7	1,9	1,5	NS	NS	1,5	0,5
	C.V. (%)	9	36	10	27	15	14	11	23	20	17	17	6
NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺	Témoin To	8,1	9,7	15,2	5,4	15,7	9,6	11,9	12,5	15,9	93,2	11,0	10,3
	Fumier Tf	31,1	8,7	11,7	8,4	26,7	9,4	12,6	15,5	36,4	98,6	15,6	9,7
	Paille Tp	23,1	10,0	11,8	13,0	28,6	9,3	14,6	9,7	40,5	107,9	13,9	15,1
	PPAS 5 %	4,6	NS	2,9	3,2	4,9	NS	2,6	2,4	9,0	NS	3,6	4,1
	C.V. (%)	11	29	11	18	10	5	10	10	15	9	13	18

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.
NS = Non significatif

ANNEXE XI.1 : Comparaison des teneurs en azote minéral du sol sableux de mi-pente dans les sacs incubés *in situ* (n = 4)

	Jours après incubation	8	15	21	28	50	60	75	95	365	372	380	410
NO ₃ ⁻	Témoin To	2,0	6,8	2,6	2,3	1,7	1,5	2,4	3,9	15,8	4,4	1,3	0,8
	Fumier Tf	6,4	12,6	4,7	7,6	6,8	7,4	8,5	9,9	49,8	54,2	25,7	3,0
	Paille Tp	2,0	5,1	2,3	3,1	2,5	1,8	9,6	5,5	34,2	30,3	32,3	2,9
	PPAS 5 %	2,4	1,1	1,0	1,8	1,6	1,4	4,8	2,2	15,0	16,8	4,4	0,9
	C.V. (%)	35	7	16	21	22	19	34	18	23	28	11	20
NH ₄ ⁺	Témoin To	1,1	0,6	1,2	1,2	0,6	1,2	1,4	0,7	3,5	7,3	4,2	3,1
	Fumier Tf	4,0	3,2	3,4	5,0	4,2	2,5	2,7	2,2	4,1	6,7	3,8	3,7
	Paille Tp	3,1	2,0	2,6	2,8	2,2	1,7	2,2	1,5	3,7	7,6	3,8	3,7
	PPAS 5 %	0,8	0,9	1,0	2,1	1,1	0,8	0,8	0,1	NS	NS	NS	0,1
	C.V. (%)	14	24	21	36	25	24	20	2	19	17	9	1
NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺	Témoin To	3,1	7,4	4,1	3,5	2,3	2,8	3,8	4,6	18,3	12,3	5,5	3,9
	Fumier Tf	10,3	15,8	7,9	12,5	11,0	9,7	10,9	12,1	53,9	60,9	29,5	6,7
	Paille Tp	5,0	7,1	5,2	5,9	4,4	3,6	10,2	6,9	37,9	37,8	36,1	6,6
	PPAS 5 %	2,8	1,3	2,0	3,6	2,6	1,7	2,3	2,2	15,9	16,9	4,5	NS
	C.V. (%)	23	6	18	25	22	16	13	14	22	23	10	8

PPAS = Plus petite amplitude significative selon le test de NEWMAN-KEULS.

NS = Non significatif

LISTE DES ANNEXES

CHAPITRE III

Annexe III.1 : Teneurs en carbone organique et azote totaux et pH des sols en fonction des systèmes de culture

Annexe III.2 : Teneurs en bases échangeables, phosphore total et phosphore assimilable des sols en fonction des systèmes de culture

CHAPITRE X

ANNEXE X.1 : Teneurs et contenus en carbone organique total des fractions granulométriques du sol en fonction des traitements (8 et 505 JAI).

ANNEXE X.2 : Teneurs et contenus en azote total des fractions granulométriques du sol en fonction des traitements (8 et 505 JAI).

CHAPITRE XI

ANNEXE XI.1 : Comparaison des teneurs en azote minéral du sol dans les sacs incubés *in situ*

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Pluviométrie mensuelle (en mm) à Bidi de 1983 à 1991.

Tableau I.2 : Nombre de périodes sèches de plus de 5 jours consécutifs sans pluies.

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Caractères analytiques du sol ferrugineux tropical peu lessivé sur dépôts sableux éoliens (Profil sous jachère)

Tableau II.2 : Caractères analytiques du sol ferrugineux tropical lessivé de bas de pente (jachère de 5 ans)

Tableau II.3 : Caractères analytiques du sol hydromorphe peu humifère à pseudogley sur matériaux colluvio-alluviaux de bas-fond (Profil sous forêt galerie dégradée)

Tableau II.4 : Caractères des systèmes de culture étudiés.

CHAPITRE III

Tableau III. 1 : Caractéristiques des volumes structuraux des profils culturaux du sol de mi-pente (MP1, MP2 et MP3)

Tableau III.2 : Caractéristiques des volumes structuraux des profils culturaux du sol de bas de pente (BP1, BP2 et BP3)

Tableau III.3 : Caractéristiques des volumes structuraux des profils culturaux du sol de bas-fond (BF1 et BF2)

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : Variation des teneurs en carbone organique et azote totaux et du pH dans l'échantillonnage composite.

Tableau IV.2 : Bilan du fractionnement granulométrique (masse, carbone et azote total)

Tableau IV.3 : Teneurs et contenus en carbone des fractions granulométriques des sols en fonction des systèmes de culture.

Tableau IV.4 : Teneurs et contenus en azote des fractions granulométriques du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture.

CHAPITRE V

Tableau V.1 : Comparaison des quantités de carbone minéralisé et des taux de minéralisation du carbone dans les trois systèmes de culture de mi-pente

Tableau V.2 : Comparaison des quantités de carbone minéralisé et des taux de minéralisation du carbone dans les trois systèmes de culture de bas de pente

Tableau V.3 : Comparaison des quantités de carbone minéralisé et des taux de minéralisation du carbone dans les deux systèmes de culture de bas-fond.

Tableau V.4 : Régression entre minéralisation du carbone et quelques caractéristiques analytiques du sols

Tableau V.5 : Azote minéralisé, en mg/kg de sol, dans des échantillons du sol de mi-pente (0-10 cm) en fonction des systèmes de culture et du temps d'incubation.

Tableau V.6 : Comparaison des quantités de carbone minéralisé et des taux de minéralisation de l'azote dans les trois systèmes de culture de mi-pente

Tableau V.7 : Azote minéralisé, en mg/kg de sol, dans des échantillons du sol de bas de pente (0-10 cm) en fonction des systèmes de culture et du temps d'incubation.

Tableau V.8 : Comparaison des quantités d'azote minéralisé et des taux de minéralisation de l'azote dans les trois systèmes de culture de bas de pente

Tableau V.9 : Azote minéralisé, en mg/kg de sol, dans des échantillons du sol de bas-fond (0-10 cm) en fonction des systèmes de culture et du temps d'incubation.

Tableau V.10 : Comparaison des quantités d'azote minéralisé et des taux de minéralisation du azote dans les deux systèmes de culture de bas-fond.

Tableau V.11 : Régression entre minéralisation de l'azote et quelques caractéristiques analytiques du sols.

CHAPITRE VI

Tableau VI.1 : Variabilité des teneurs en azote minéral (en mg/kg de sol) de l'échantillon composite dans le sol cultivé sans labour en mi-pente (MP2) à deux dates de prélèvement.

CHAPITRE IX

Tableau IX.1 : Caractères analytiques de la couche 0-15 cm des sols incubés.

Tableau IX.2 : Caractères chimiques de la matière organique utilisée

CHAPITRE X

Tableau X.1 : Paramètres de la cinétique de décomposition in situ du carbone des traitements fumier et paille de mil en fonction du type de sol.

Tableau X.2 : Variation des teneurs en carbone organique total des fractions granulométriques des traitements entre 8 et 505 jours après mise en incubation.

Tableau X.3 : Variation des contenus en azote total des fractions granulométriques des traitements entre 8 et 505 jours après mise en incubation

Tableau X.4 : Comparaison des teneurs en carbone organique et azote totaux des traitements par type de sol.

Tableau X.5 : Gain en carbone (mgC/g de sol) et azote total (mgN/g de sol) des traitements fumier et paille de mil par rapport au témoin en fin d'incubation (505 JAI).

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

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

Figure I.2 : Les Zones climatiques du Burkina Faso

Figure I.3 : Diagramme ombrothermique à Bidi de 1983 à 1991

Figure I.4 : Moyenne des températures décadaires à Bidi de 1983 à 1991

Figure I.5 : Carte géomorphologique de la région de Bidi. (D'après GUILLET, 1992)

Figure I.6 : Coupe schématique du modélé en région granitique. (D'après BOULET, 1968)

CHAPITRE II

Figure II.1 : Résumé de quelques caractères des sols étudiés.

CHAPITRE III

Figure III.1 : Volumes structuraux dans l'horizon 0-30 cm des profils culturaux du sol de mi-pente.

Figure III.2 : Volumes structuraux dans l'horizon 0-35 cm des profils culturaux du sol de bas de pente.

Figure III.3 : Volumes structuraux dans l'horizon 0-35 cm des profils culturaux du sol hydromorphe peu humifère à pseudogley de bas-fond.

Figure III.4 : Profil granulométrique du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture

Figure III.5 : Profil granulométrique du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture

Figure III.6 : Profil granulométrique du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture

Figure III.7 : Profils des teneurs en carbone organique et azote totaux du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture.

Figure III.8 : Profils des teneurs en carbone organique et azote totaux du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture.

Figure III.9 : Profils des teneurs en carbone organique et azote totaux du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture.

Figure III.10 : Profils de pH et des teneurs en cations échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture

Figure III.11 : Profils de pH et des teneurs en cations échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture

Figure III.12 : Profils de pH et des teneurs en cations échangeables, phosphore total et phosphore assimilable du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Contenus en carbone organique total dans les fractions granulométriques de l'horizon 0-10 cm des sols en fonction des systèmes de culture.

Figure IV.2 : Contenus en azote total dans les fractions granulométriques de l'horizon 0-10 cm des sols en fonction des systèmes de culture.

CHAPITRE V

Figure V.1 : Minéralisation du carbone de l'horizon 0-10 cm du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture.

Figure V.2 : Minéralisation du carbone de l'horizon 0-10 cm du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture.

Figure V.3 : Minéralisation du carbone de l'horizon 0-10 cm du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture.

Figure V.4 : Relation entre le carbone minéralisé (en mg/kg de sol) et les teneurs en carbone organique total des sols.

Figure V.5 : Minéralisation nette de l'azote de l'horizon 0-10 cm du sol de mi-pente en fonction des systèmes de culture.

Figure V.6 : Minéralisation nette de l'azote de l'horizon 0-10 cm du sol de bas de pente en fonction des systèmes de culture.

Figure V.7 : Minéralisation nette de l'azote de l'horizon 0-10 cm du sol de bas-fond en fonction des systèmes de culture.

CHAPITRE VI

Figure VI.1 : Pluviométrie journalière (en mm) à Bidi pendant les saisons de culture de 1989 et 1990

CHAPITRE VII

Figure VII.1 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle décadaires à Bidi de mai à octobre 1990

Figure VII.2 : Variation de l'humidité du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture

Figure VII.3 : Variation de l'humidité du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture

Figure VII.4 : Variation de l'humidité du sol de bas-fond (BF) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture

Figure VII.5 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle décadaires à Bidi de mai à octobre 1989

Figure VII.6 : Variation de l'humidité du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture

Figure VII.7 : Variation de l'humidité du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture

CHAPITRE VIII

Figure VIII.1 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture

Figure VIII.2 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture

Figure VIII.3 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de bas-fond (BF) au cours de la saison pluvieuse de 1990 en fonction des systèmes de culture

Figure VIII.4 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de mi-pente (MP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture

Figure VIII.5 : Variation des teneurs en azote minéral du sol de bas de pente (BP) au cours de la saison pluvieuse de 1989 en fonction des systèmes de culture

Figure VIII.6 : Mobilisation de l'azote par une culture de mil en fonction du stade phénologique (D'après BLONDEL, 1971a)

CHAPITRE IX

Figure IX.1 : Dispositif expérimental de l'incubation in situ

Figure IX.2 : Variation de l'humidité du sol dans les sacs incubés

CHAPITRE X

Figure X.1 : Evolution des teneurs en carbone organique total des deux sols incubés en fonction des traitements poudrette de fumier et paille de mil et du temps d'incubation

Figure X.2 : Evolution des teneurs en azote total des deux sols incubés en fonction des traitements poudrette de fumier et paille de mil et du temps d'incubation

Figure X.3 : Evolution du rapport C/N des deux sols incubés en fonction des traitements poudrette de fumier et paille de mil et du temps d'incubation

Figure X.4 : Contenus en carbone organique total (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol sableux de mi-pente à 8 et 505 jours après la mise en incubation (JAI)

Figure X.5 : Contenus en carbone (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol argilo-limoneux de bas-fond à 8 et 505 jours après la mise en incubation (JAI)

Figure X.6 : Contenus en azote total (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol sableux de mi-pente à 8 et 505 jours après la mise en incubation (JAI)

Figure X.7 : Contenus en azote total (en mg/g de sol) dans les fractions granulométriques des traitements du sol argilo-limoneux à 8 et 505 jours après la mise en incubation (JAI)

CHAPITRE XI

Figure XI.1 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de mi-pente incubé *in situ* (1ère saison)

Figure XI.2 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de bas-fond incubé *in situ* (1ère saison)

Figure XI.3 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de mi-pente incubé *in situ* (2ème saison)

Figure XI.4 : Variation de la minéralisation nette de l'azote dans le sol de bas-fond incubé *in situ* (2ème saison)

CHAPITRE XII

Figure XII.1 : Minéralisation nette de l'azote dans un sol bas-fond incubé avec et sans poudrette de fumier en fonction des conditions hydriques simulées au laboratoire

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	3
--------------------	---

INTRODUCTION GENERALE	8
-----------------------------	---

**PREMIERE PARTIE :
CONDITIONS DU MILIEU ET CARACTERISTIQUES DES SITUATIONS ETUDIEES**

CHAPITRE I : PRESENTATION DU MILIEU ETUDIE	12
---	-----------

1. CLIMAT	12
1.1. Précipitations et Evapotranspiration	12
1.2. Températures	16
1.3. Vents	17
1.4. Conclusion	17

2. GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE	17
-------------------------------------	----

3. VEGETATION	19
---------------------	----

4. SOLS	20
---------------	----

5. MILIEU HUMAIN ET ACTIVITES AGRICOLES	20
5.1. Systèmes d'élevage	20
5.2. Systèmes de culture	21
5.2.1. Cultures et successions culturales	21
5.2.2. Itinéraires techniques	21
5.2.2.1. Préparation du sol	22
5.2.2.2. Fertilisation	22
5.2.2.3. Façons culturales	23
5.2.3. Principaux systèmes de culture	23

6. CONCLUSION	23
---------------------	----

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES SITUATIONS ETUDIEES	25
---	-----------

1. CARACTERES DES SOLS ETUDIES	25
1.1. Sol ferrugineux tropical peu lessivé sur matériaux sableux éoliens en mi-pente	25
1.1.1. Caractères morphologiques	25
1.1.2. Caractères analytiques	26
1.1.3. Conclusion	28
1.2. Sol ferrugineux tropical lessivé de bas de pente	28
1.2.1. Caractères morphologiques	28
1.2.2. Caractères analytiques	29
1.2.3. Conclusion	30
1.3. Sol hydromorphe à pseudogley sur matériaux colluvio-alluviaux de bas-fond	31
1.3.1. Caractères morphologiques	31
1.3.2. Caractères analytiques	32
1.3.3. Conclusion	34
1.4. Conclusion	34

2. CARACTERISTIQUES DES SYSTEMES DE CULTURE ETUDIES	36
2.1. Systèmes de culture sur le sol de mi-pente	36
2.2. Systèmes de culture sur le sol de bas de pente	37
2.3. Systèmes de culture sur le sol de bas-fond	37
2.4. Critères du choix des systèmes de culture	38
2.5. Conclusion	38

**DEUXIEME PARTIE :
MODIFICATIONS DES CARACTERES DES SOLS PAR LES SYSTEMES DE
CULTURE**

CHAPITRE III : INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LES CARACTERES MORPHOLOGIQUES, PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS	42
1. METHODOLOGIE	42
1.1. Délimitation d'une parcelle d'étude	42
1.2. Caractérisation morphologique	42
1.3. Détermination analytique	42
1.4. Conclusion	43
2. INFLUENCE SUR LES CARACTERES MORPHOLOGIQUES DES SOLS	44
2.1. Sol de mi-pente	44
2.2. Sol de bas de pente	47
2.3. Sol de bas-fond	50
2.4. Discussion	53
3. INFLUENCE SUR LA GRANULOMETRIE DES SOLS	54
3.1. Sol de mi-pente	54
3.2. Sol de bas de pente	55
3.3. Sol de bas-fond	55
3.4. Discussion	57
4. INFLUENCE SUR LE STATUT ORGANIQUE DES SOLS (CARBONE ORGANIQUE ET AZOTE TOTAUX)	58
4.1. Sol de mi-pente	58
4.2. Sol de bas de pente	58
4.3. Sol de bas-fond	60
4.4. Discussion	60
5. INFLUENCE SUR LES CARACTERES CHIMIQUES DES SOLS	62
5.1. Sol de mi-pente	62
5.1.1. Bases échangeables	62
5.1.2. Le pH	63
5.1.3. Phosphore total et phosphore assimilable	63
5.2. Sol de bas de pente	65
5.2.1. Bases échangeables	65
5.2.2. Le pH	66
5.2.3. Phosphore total et phosphore assimilable	66
5.3. Sol de bas-fond	68
5.3.1. Bases échangeables	68
5.3.2. Le pH	68
5.3.3. Phosphore total et phosphore assimilable	70
5.4. Discussion	70
6. CONCLUSION	71

CHAPITRE IV : INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LA REPARTITION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES DES SOLS	74
1. METHODOLOGIE	74
1.1. Prélèvement des échantillons	74
1.2. Fractionnement granulométrique de la matière organique	75
2. RESULTATS	76
2.1. Bilan en masse, en carbone organique total et en azote total	76
2.2. Caractéristiques chimiques des fractions	76
2.2.1. Fraction grossière (2000/50 μm)	76
2.2.2. Fraction fine (< 50 μm)	77
2.3. Répartition du carbone organique total et de l'azote total dans les fractions	81
2.3.1. Carbone organique total	81
2.3.2. Azote total	82
3. DISCUSSION	84
4. CONCLUSION	85
CHAPITRE V : INFLUENCE DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LE POUVOIR MINERALISATEUR DES SOLS	87
1. METHODOLOGIE	87
1.1. Minéralisation du carbone	87
1.2. Minéralisation nette de l'azote	88
2. RESULTATS ET DISCUSSIONS	89
2.1. Minéralisation du carbone	89
2.1.1. Influence des systèmes culture	89
2.1.1.1. Sol de mi-pente	89
2.1.1.2. Sol de bas de pente	90
2.1.1.3. Sol de bas-fond	91
2.1.2. Facteurs influençant la minéralisation du carbone	93
2.2. Minéralisation de l'azote	95
2.2.1. Influence des systèmes de culture	95
2.2.1.1. Sol de mi-pente	95
2.2.1.2. Sol de bas de pente	98
2.2.1.3. Sol de bas-fond	100
2.2.2. Facteurs influençant la minéralisation de l'azote	103
3. CONCLUSION	105
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	107

TROISIEME PARTIE :
ETUDE DE LA VARIATION SAISONNIERE DE L'AZOTE MINERAL DES SOLS AU COURS DE LA SAISON DE CULTURE

CHAPITRE VI : MATERIEL ET METHODES D'ETUDE	112
1. DISPOSITIF DE SUIVI AU CHAMP	112
2. DETERMINATIONS ANALYTIQUES	113
2.1. Caractérisation des conditions hydriques	113
2.2. Dosage de l'azote minéral	113
2.3. Variabilité de l'échantillonnage composite	115
2.4. Limite de la méthode	115
CHAPITRE VII : VARIATION DES CONDITIONS DES SOLS AU COURS DES SAISONS DE CULTURE DE 1990 ET 1989	117
1. SAISON PLUVIEUSE DE 1990	117
1.1. Sol de mi-pente	119
1.2. Sol de bas de pente	121
1.3. Sol de bas-fond	123
2. SAISON PLUVIEUSE DE 1989	125
2.1. Sol de mi-pente	125
2.2. Sol de bas de pente	125
3. CONCLUSION	129
CHAPITRE VIII : VARIATION DES TENEURS EN AZOTE MINERAL DES SOLS AU COURS DE LA SAISON DE CULTURE	131
1. RESULTATS	131
1.1. Saison pluvieuse de 1990	131
1.1.1. Sol de mi-pente	131
1.1.2. Sol de bas de pente	133
1.1.3. Sol de bas-fond	135
1.1.4. Conclusion	137
1.2. Saison pluvieuse de 1989	138
1.2.1. Sol de mi-pente	138
1.2.2. Sol de bas de pente	138
1.2.3. Conclusion	141
2. DISCUSSION	141
2.1. Quelques aspects de la dynamique de l'azote minéral au champ	141
2.1.1. Minéralisation de l'azote	142
2.1.2. Réorganisation	142
2.1.3. Absorption des plantes	142
2.1.4. Lixiviation	143
2.1.5. Dénitrification	144
2.1.6. Conclusion	144
2.2. Evolution des teneurs en azote minéral au cours de la saison de culture	144
2.3. Effet des types des sols sur la minéralisation nette de l'azote au champ	146
2.4. Effet des systèmes de culture et opérations culturales sur la minéralisation nette de l'azote au champ	146
2.5. Relation entre minéralisation nette de l'azote <i>in situ</i> et caractéristiques de sols	147
3. CONCLUSION	148

QUATRIEME PARTIE :
ETUDE DE LA MATIERE ORGANIQUE ET DE L'AZOTE DANS LE SOL
FERRUGINEUX SABLEUX DE MI-PENTE ET DANS LE SOL HYDROMORPHE
ARGILO-LIMONEUX DE BAS-FOND

CHAPITRE IX : METHODOLOGIE	151
1. INCUBATION IN SITU	151
1.1. Matériel	151
1.1.1. Caractères des sols	151
1.1.2. Caractères de la matière organique utilisée	151
1.2. Méthode d'incubation	153
1.3. Conditions hydriques	155
2. INCUBATION AU LABORATOIRE	155
2.1. Objectif	155
2.2. Matériel et méthode	157
3. DETERMINATIONS ANALYTIQUES	158
4. METHODE D'AJUSTEMENT	158
CHAPITRE X : DYNAMIQUE IN SITU DU CARBONE ET DE L'AZOTE TOTAL DANS LES CONDITIONS PEDOCLIMATIQUES DE MI-PENTE ET DE BAS-FOND	159
1. EVOLUTION DES TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE ET AZOTE TOTAUX ET DU RAPPORT C/N	159
1.1. Carbone organique total	159
1.2. Azote total	160
1.3. Rapport C/N	162
1.4. Discussion	162
2. EVOLUTION DU CARBONE ORGANIQUE ET DE L'AZOTE TOTAL DANS LES DIFFERENTES FRACTIONS DU SOL	163
2.1. Carbone organique total	164
2.1.1. Sol sableux de mi-pente	164
2.1.2. Sol argilo-limoneux de bas-fond	165
2.2. Azote total et rapport C/N	168
2.2.1. Sol sableux de mi-pente	168
2.2.2. Sol argilo-limoneux de bas-fond	169
2.3. Discussion	172
3. EFFET DES APPORTS SUR L'ENRICHISSEMENT EN CARBONE ORGANIQUE ET AZOTE TOTAL DU SOL	173
4. CONCLUSION	175
CHAPITRE XI : EFFET DES APPORTS ORGANIQUES SUR LA DYNAMIQUE IN SITU DE L'AZOTE MINERAL DANS LES CONDITIONS PEDOCLIMATIQUES DE MI-PENTE ET DE BAS-FOND	178
1. EVOLUTION DES TENEURS EN AZOTE AU COURS DE LA PREMIERE SAISON PLUVIEUSE D'INCUBATION (1989)	178

1.1. Résultats	178
1.1.1. Sol de mi-pente	178
1.1.2. Sol de bas-fond	179
1.2. Discussion	182
1.2.1. Minéralisation nette au cours de la saison	182
1.2.2. Effet des conditions pédoclimatiques	183
1.2.3. Effet des apports organiques	183
2. MINERALISATION NETTE DE L'AZOTE PENDANT LA DEUXIEME SAISON PLUVIEUSE D'INCUBATION (1990)	184
2.1. Résultats	184
2.1.1. Sol de mi-pente	184
2.1.2. Sol de bas-fond	185
2.2. Discussion	185
3. CONCLUSION	188
CHAPITRE XII : EFFET DES CONDITIONS HYDRIQUES DE BAS-FOND SIMULEES AU LABORATOIRE SUR LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE MINERAL EN PRESENCE OU NON D'APPORT ORGANIQUE	190
1. RESULTATS	190
1.1. Minéralisation nette en conditions hydriques normales	190
1.2. Minéralisation nette de l'azote en fonction des conditions de submersion	191
1.2.1. Azote minéral après une submersion du sol sec	191
1.2.2. Azote minéral après une submersion du sol préalablement humidifié	191
1.2.2.1. Submersion de longue durée	191
1.2.2.2. Submersion de courte durée	192
2. DISCUSSION	194
2.1. Effet de la submersion sur la minéralisation nette de l'azote d'un sol sec	195
2.2. Effet de la submersion sur la minéralisation nette de l'azote d'un sol préalablement humidifié	195
3. CONCLUSION	196
CONCLUSION DE LA QUATRIEME PARTIE	198
CONCLUSION GENERALE	201
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	208
ANNEXES	219
LISTES DES ANNEXES	229
LISTES DES TABLEAUX	230
LISTES DES FIGURES	233
TABLES DES MATIERES	238