



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

136006420 0

99INPL086W

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE ET DES INDUSTRIES
ALIMENTAIRES

[1] 1999 GUIBERT, H.

THÈSE

Présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'INPL

Spécialité : Sciences agronomiques

par

Hervé GUIBERT
Ingénieur agronome

Sujet :

**ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE
CATIONIQUE DES ALFISOLS TROPICAUX CULTIVÉS**

Soutenue publiquement le 01/10/1999 devant la commission d'examen

Membres du jury :

MM.

A. GUCKERT
F. ANDREUX
J.-R. BAILLY
F. GANRY
L. SEINY BOUKAR
P. FALLAVIER

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de Thèse
Examineur
Examineur

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

REMERCIEMENTS

La recherche est un acte collectif. Les résultats présentés ici n'échappent pas à ce principe. Nombreuses sont les personnes qui m'ont aidé à les conduire à terme, celles que j'ai rencontrées ou côtoyées et celles qui y ont contribué à travers leurs publications.

Parmi les personnes qui s'y sont officiellement investies, je remercie le Professeur A. Gückert d'avoir accepté mon inscription et les contretemps inhérents à mon appartenance au Cirad pendant la réalisation du travail. J'exprime mes plus vifs remerciements à F. Ganry, qui est venu visiter les expérimentations et réalisations à Bébédjia et a accepté de diriger mon travail. A travers lui, je souhaite remercier toutes les personnes au Cirad qui encouragent et permettent la réalisation de travaux de thèse. Ma reconnaissance va également aux membres de mon comité de thèse : P. Fallavier, M. Crétenet et R. Oliver pour leur implication. Que soient également remerciés MM les Professeurs F. Andreux, J.-R. Bailly et S. Boukar pour l'examen de mon travail et leur participation au jury.

Parmi les personnes qui ont largement contribué à la réalisation de ce travail, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à C. Feller pour sa disponibilité et son suivi du début à la fin du travail. Je suis également redevable à H. Manichon, G. Trébuil, M. Brouwers et E. Gozé de m'avoir apporté leur aide et conseils pour la rédaction du mémoire. Les résultats de cette étude sont le fruit du travail de plusieurs équipes et laboratoires : ceux de la station de Bébédjia, et grâce à J. Gigou et S. T. Kouassi-Brédoumy qui m'ont mis à disposition leurs résultats, ceux de la station de Gagnoa, ainsi que les personnels des laboratoires Lcsc de l'Ird et Ura du Cirad. Je suis particulièrement reconnaissant à J.-J. Roméro et E. Gavinelli pour leur efficace contribution et les agréables moments passés ensemble.

Toutes les personnes qui, au quotidien, m'ont apporté aide, soutien, conseils et rendu de nombreux services ne peuvent être cités ici, notamment mes collègues tchadiens, compagnons de travail et de la vie de tous les jours, et ceux du Programme Coton du Cirad-ca. J'exprime ma reconnaissance à tous et en particulier à J. N'Gamine et D. Dureau pour leur aide et disponibilité de tout les instants.

Sommaire

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	1
Sommaire	2
Table des matières	3
Liste des tableaux	6
Liste des figures	8
Introduction	10
Chapitre 1	
Approche spatiale des relations entre productivité et teneur en carbone des sols : le cas du bassin cotonnier du Tchad	16
1.1. Introduction	17
1.2. Matériel et méthodes	18
1.2.1. Sols cultivés du bassin cotonnier du Tchad	18
1.2.2. Principe du diagnostic	19
1.2.3. Dispositif	20
1.2.4. Mesures réalisées	23
1.2.5. Méthodes d'analyses de sols	24
1.3. Résultats	24
1.3.1. Moyenne et variabilité des observations réalisées	24
1.3.2. Résultats par village	27
1.3.3. Régressions linéaires du rendement en fonction des variables observées	28
1.3.4. Interprétation des relations entre rendement et variables sol par courbes enveloppes	33
1.3.5. Résultats de la réponse de la culture du cotonnier à l'apport de potassium	35
1.4. Discussion	36
Remarque préliminaire	36
1.4.2. Régressions linéaires du rendement en fonction des variables explicatives	36
1.4.3. Seuils des caractéristiques physico-chimiques des sols	38
1.4.3.1. Caractéristiques de sol sans valeur seuil	38
1.4.3.2. Groupe de caractéristiques pour lesquelles le classement des parcelles par rapport aux valeurs seuils est équivalent ..	40
1.4.3.3. Le taux d'argile définissant le second axe de l'ACP	41
1.4.3.4. Des caractéristiques de sols participant aux deux axes de l'ACP	41
1.4.4. Conclusion	42

Chapitre 2

Evolution du carbone des sols tropicaux sous culture : étude des expérimentations d'apports organiques à long-terme	43
2.1. Introduction	44
2.2. Matériel et méthodes	45
2.2.1. Expérimentations étudiées	45
2.2.1.1. Au Tchad, sur la station de Bébédjia	45
2.2.1.1.1. L'essai B1	45
2.2.1.1.2. L'essai B4	47
2.2.1.2. En Côte d'Ivoire, sur la station de Gagnoa	48
2.2.2. Prélèvements de sol et analyses	49
2.2.3. Analyses statistiques des résultats	50
2.2.4. Détermination des coefficients du modèle de Hénin-Dupuis	52
2.2.4.1. Intérêt du modèle	52
2.2.4.2. Principes du calcul	53
2.2.4.3. Inconvénient du modèle	55
2.2.4.4. Données servant aux détermination pour les cas étudiés	56
2.3. Résultats	56
2.3.1. Evolution des teneurs du sol en C et N	56
2.3.2. Calcul des paramètres du modèle de Hénin-Dupuis	58
2.3.3. Evolution des rendements	59
2.3.3.1. Effet des apports de matière organique préhumifiée	61
2.3.3.2. Effet des apports de matière organique fraîche	62
2.3.3.3. Effet des apports de tourteau de coton	62
2.4. Discussion	64
2.4.1. Evolution des teneurs en C et N du sol	64
2.4.2. Relations entre évolutions de la matière organique du sol et des rendements	65
2.4.3. Conclusion	66

Chapitre 3

Utilisation des fractions granulométriques pour la prévision de l'évolution du stock organique des sols tropicaux sous culture	71
3.1. Introduction	72
3.2. Matériel et méthodes	74
3.2.1. Dispositifs servant de support aux fractionnements	74
3.2.1.1. Station de Bébédjia	75
3.2.1.2. Station de Gagnoa	77
3.2.2. Echantillons de sols fractionnés	77
3.2.3. Fractionnements granulométriques du sol et déterminations des teneurs en C et N	78
3.3. Résultats	80
3.3.1. Effet des apports organiques sur la teneur en C et N des sols	80
3.3.2. Résultats du fractionnement granulométrique du sol avec MOS	80
3.3.2.1. Qualité des fractionnements réalisés	80
3.3.2.2. Précisions des données issues des fractionnements	82

3.3.3. Caractéristiques des fractions	84
3.3.4. Impacts des apports organiques sur les fractions de MOS	84
3.4. Discussion	89
3.4.1. Effet du mode de gestion des sols sur les différentes fractions de matière organique du sol	89
3.4.2. Application du modèle de Hénin-Dupuis aux fractions de matière organique du sol	90
3.4.3. Conséquences sur la cinétique des différentes fractions	94
3.4.4. Conclusion	95
Chapitre 4	
Contribution des fractions granulométriques de la matière organique à la capacité d'échange cationique des Alfisols : application aux effets des amendements organiques	97
4.1. Introduction	98
4.2. Matériel et Méthodes	100
4.2.1. Dispositifs servant de support aux fractionnements	100
4.2.2. Fractionnements granulométriques	103
4.2.3. Déterminations des teneurs en C et de la CEC	103
4.3. Résultats et discussions	104
4.3.1. Vérifications de la règle d'additivité	104
4.3.2. Caractéristiques des fractions	106
4.3.3. CEC des fractions	109
4.3.4. Conclusion	110
Conclusion et perspectives	112
Conclusions	113
Perspectives	115
RÉFÉRENCES	118
Avertissement	119
Références citées	120
Références bibliographiques	129
ANNEXES	139
Liste des annexes	140

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : les principaux fractionnements de la matière organique des sols.	14
Tableau 2 : localisation et contexte socio-économique des villages du diagnostic agronomique (Tchad, 1994).	22
Tableau 3 : moyennes et écarts types des principales mesures et observations du diagnostic agronomique réalisé au Tchad en 1994.	25
Tableau 4 : résultat de l'analyse en composantes principales du positionnement des parcelles par rapport aux seuils des caractéristiques physico-chimiques des sols, prélèvements de sol 0-10 cm (diagnostic agronomique, Tchad, 1994). ...	33
Tableau 5 : résultats de l'analyse de la variance du regroupement des essais "doses de sulfate de potassium" sur cotonniers (Tchad, 1994).	34
Tableau 6 : résultats de la régression du rendement en coton-graine (kg ha ⁻¹) et des variables culturales pour 157 essais (Tchad, 1994).	37
Tableau 7 : doses d'engrais minéral et de matière organique sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad.	47
Tableau 8 : prélèvement et analyses disponibles sur les essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.	49
Tableau 9 : coefficients des contrastes sur les effets simples, essai B1, Bébédjia, Tchad. ...	50
Tableau 10 : coefficients utilisés pour les contrastes de l'interaction sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad.	50
Tableau 11 : évolution des teneurs en C et N du sol, prélèvement 0-20 cm, sur l'essai B4, Bébédjia, Tchad et l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.	56
Tableau 12 : paramètres du modèle de Hénin-Dupuis, essais B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.	58
Tableau 13 : effet sur le rendement de la culture de maïs, année 1994, d'apport de matière organique de différentes compositions minérales, essai B4, Bébédjia, Tchad.	67
Tableau 14 : effets des apports de compost et de N engrais sur le rendement, année 1981, et les caractéristiques chimiques du sol, prélèvement 0-20 cm, année 1981, essai G, Gagnoa.	69
Tableau 15 : provenance des échantillons de sols fractionnés.	74
Tableau 16 : caractéristiques physico-chimiques initiales des sols (0-20 cm) des essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.	75
Tableau 17 : constitution des échantillons de sols M (avec apport organique) fractionnés.	77
Tableau 18 : effet des apports organiques sur la teneur en C et N du sol pour les essais B1, B4 (Bébédjia, Tchad) et G (Gagnoa, Côte d'Ivoire).	79
Tableau 19 : variabilité des mesures sur les fractions granulométriques obtenues sans destruction de la matière organique : CV obtenus à partir de deux fractionnements par échantillon de sol, sur 16 échantillons.	83
Tableau 20 : résultats des fractionnements sans destruction de la matière organique ; essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, 11 (G11) et 22 (G22) années après la mise en place de l'essai	85
Tableau 21 : détermination des paramètres du modèle de Hénin-Dupuis appliqué au sol total et aux fractions granulométriques pour C et N (essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire).	92

Tableau 22 : prévisions des contenus en C ($t\ ha^{-1}$) des 20 premiers cm de sol à l'équilibre pour l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, par le modèle de Hénin-Dupuis appliqué au sol total et à trois fractions granulométriques.	94
Tableau 23 : effets des applications de matière organique (MO) sur la teneur en C, le pH et la capacité d'échange cationique des sols à faible activité argileuse en Afrique sub-saharienne (revue bibliographique d'expérimentations à long-terme).	99
Tableau 24 : origine des échantillons de sols étudiés.	100
Tableau 25 : caractéristiques physico-chimiques initiales de surface (0-20 cm) des sols des essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).	102
Tableau 26 : somme de la capacité d'échange cationique (CEC) des fractions en % de la CEC du sol non fractionné avec deux méthodes de détermination de la CEC, essais de Bébédjia (Tchad) et Gagnoa (Côte d'Ivoire).	105
Tableau 27 : masse des fractions en pourcentage de la masse du sol non fractionné, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).	106
Tableau 28 : teneur en C des fractions, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire)..	107
Tableau 29 : effet des apports de matière organique sur la capacité d'échange cationique des fractions et du sol non fractionné, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).	107
Tableau 30 : effet des apports organiques sur la contribution des fractions à la capacité d'échange cationique du sol non fractionné, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).	110

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : représentation des principales fonctions de la matière organique des sols.	12
Figure 2 : localisation des villages du diagnostic agronomique, année 1994	21
Figure 3 : part d'explication de la variabilité des rendements observés par une fonction linéaire des variables climat (A), sol (B), opérations culturales (C) et de l'ensemble des trois catégories variables.	28
Figure 4 : part d'explication supplémentaire de la variabilité des rendements mesurés apportée par chaque catégorie de variable (exemple C/AB) par rapport à celles apportées par les deux autres catégories (exemple : AB).	29
Figure 5 : relations entre rendement et caractéristique physico-chimique des sols (diagnostic agronomique, Tchad, 1994).	30
Figure 6 : représentation des parcelles des cinq villages dans le plan formé par les axes issus de l'analyse en composante principale sur le positionnement des parcelles par rapport aux seuils des principales caractéristiques physico-chimiques des sols.	34
Figure 7 : relations entre K échangeable et capacité d'échange cationique, entre K échangeable et N total et entre capacité d'échange cationique et C total, (diagnostic agronomique, Tchad, 1994).	38
Figure 8 : exemple de répétition de l'essai B1, Bébédjia, Tchad.	46
Figure 9 : schéma du fonctionnement du compartiment de matière organique du sol selon le modèle de Hénin-Dupuis.	54
Figure 10 : effets d'apports de matières organiques et minéraux équivalents en N sur les rendements, essai B1, Bébédjia, Tchad	58
Figure 11 : effet des apports de matière organique et d'urée sur les rendements, essai B4, Bébédjia, Tchad.	60
Figure 12 : effet des apports de tourteau de coton et d'urée sur les rendements, essai B4, Bébédjia, Tchad.	61
Figure 13 : effet du compost sur le rendement du maïs de premier cycle de culture en l'absence d'apport de N engrais, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.	62
Figure 14 : effet du compost sur le rendement du maïs de premier cycle de culture avec 160 kg ha ⁻¹ de N engrais, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.	63
Figure 15 : comparaisons entre les échantillons de sol total et leurs fractions granulométriques. Moyennes et intervalles de confiance (à 95%) des rapports de la somme des fractions au sol total (base 100) de 32 fractionnements pour la masse et les contenus en carbone et azote.	81
Figure 16 : variabilité des rapports de la somme des fractions au sol total (base 100) de 32 fractionnements pour la masse et les contenus en carbone et azote.	81
Figure 17 : comparaisons des résultats de 32 fractionnements avec et sans destruction de la matière organique. Moyennes et intervalles de confiance (à p<0.05) des résultats du fractionnement sans destruction de la matière organique rapportés à ceux du fractionnement avec destruction de la matière organique (base 100).	82

Figure 18 : proportions de la masse du sol total, teneurs en C et N, proportions du C et N du sol total et rapports C/N des fractions sable grossier (Sg), sable fin (Sf), limon grossier (Lg), limon fin (Lf) argile (A) et soluble (So). Moyennes des fractionnements réalisés sur l'essai G (Gagnoa, Côte d'Ivoire, 8 sols) et les essais B1 et B4 (Bébédjia, Tchad, 8 sols).	88
Figure 19 : impacts des apports organiques sur les contenus en C et N des différentes fractions sur l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire (22 et 11 ans d'apports de compost), sur l'essai B4, Bébédjia, Tchad (4 ans d'apports de fumier) et sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad (1 an d'apport de fumier).	89
Figure 20 : répartition de l'augmentation de C et N du sol occasionnée par les apports organiques selon les fractions. Essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire (22 et 11 ans d'apports de compost) ; essai B4, Bébédjia, Tchad (4 ans d'apports de fumier) et essai B1, Bébédjia, Tchad (1 an d'apport de fumier).	89
Figure 21 : mesures et prévisions du stock de C dans les 20 premiers centimètres de sol de l'essai G de Gagnoa, Côte d'Ivoire, par 3 modèles. Modèle 1 : modèle de Hénin appliqué au sol total ; modèle 2 : somme de deux modèles de Hénin appliqués aux fractions supérieures et inférieures à 20 μm ; modèle 3 : somme de trois modèles de Hénin appliqués aux fractions sables, limons et argiles + solubles.	92
Figure 22 : somme des masses, teneur en C et capacité d'échange	104
Figure 23 : différence entre la somme de la capacité d'échange cationique des fractions et la capacité d'échange cationique du sol non fractionné en fonction de la teneur en argile pour huit échantillons de sol des essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).	106
Figure 24 : capacité d'échange cationique des fractions en fonction de leur teneur en C.	107
Figure 25 : effet des apports de matière organique sur la capacité d'échange cationique d'origine organique par unité de C des fractions, essai de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire). Voir tableau pour le code des échantillons de sol.	110

Introduction

INTRODUCTION

“La terre blanchit” disent certains agriculteurs du village de Bétima (Tchad, Préfecture du Logone Oriental) quand on leur demande à quoi ils rattachent la baisse des rendements des cultures qu’ils constatent. Mais d’autres agriculteurs mettent en parallèle cette baisse de productivité avec d’autres modifications du milieu : la baisse de la pluviométrie, la recrudescence de parasites des cultures en particulier. Les facteurs d’élaboration du rendement des cultures constituent une question au centre des préoccupations des agriculteurs et agronomes.

Si le parallèle entre une modification de milieu et une baisse de productivité des cultures est assez facile à constater, il est plus difficile d’établir s’il s’agit d’un lien de cause à effet entre ces deux phénomènes. C’est en grande partie l’objectif de ce travail : mettre en évidence et caractériser les fonctions de la matière organique des sols (MOS) dans le maintien de la capacité de production - ou fertilité - des sols.

L’identification des fonctions de la MOS dans le schéma d’élaboration de la production végétale a fait très tôt l’objet de théories contradictoires. En opposition à la “Théorie de l’humus”, développée par Thaer au début du dix-huitième siècle, s’est imposée au milieu du dix-neuvième siècle la “Théorie de la nutrition minérale de la plante” de Liebig (Feller, 1997). Ces débats contradictoires ont eu une forte influence sur les conduites agricoles. A la pratique de l’agriculture “en bon père de famille” fortement ancrée dans la culture européenne, soucieuse de la préservation du capital-sol, a succédé une intensification des cultures basée principalement sur la fertilisation par les engrais chimiques. Cette intensification a engendré une chute de la teneur en MOS des sols, e.g. de 22 à 18 g kg⁻¹ en 20 ans dans le département de l’Aisne avec corrélativement apparition d’accidents culturels (Rémy et Marin-Lafleche, 1976). Une intensification analogue, basée sur l’utilisation d’intrants agricoles a été vulgarisée en zones cotonnières d’Afrique francophone (Badiane, 1993). Celle-ci s’est développée dans un contexte d’accroissement de la pression foncière, d’abandon progressif des jachères et d’absence de techniques de restitutions organiques. Dans ces conditions, avec un milieu propice à la minéralisation de la MOS, le taux de MOS des sols sous culture décroît rapidement (Siband, 1974).

On sait aujourd’hui que la matière organique n’est pas indispensable aux plantes. La technique de culture hors-sol en est une démonstration : la production végétale est possible en

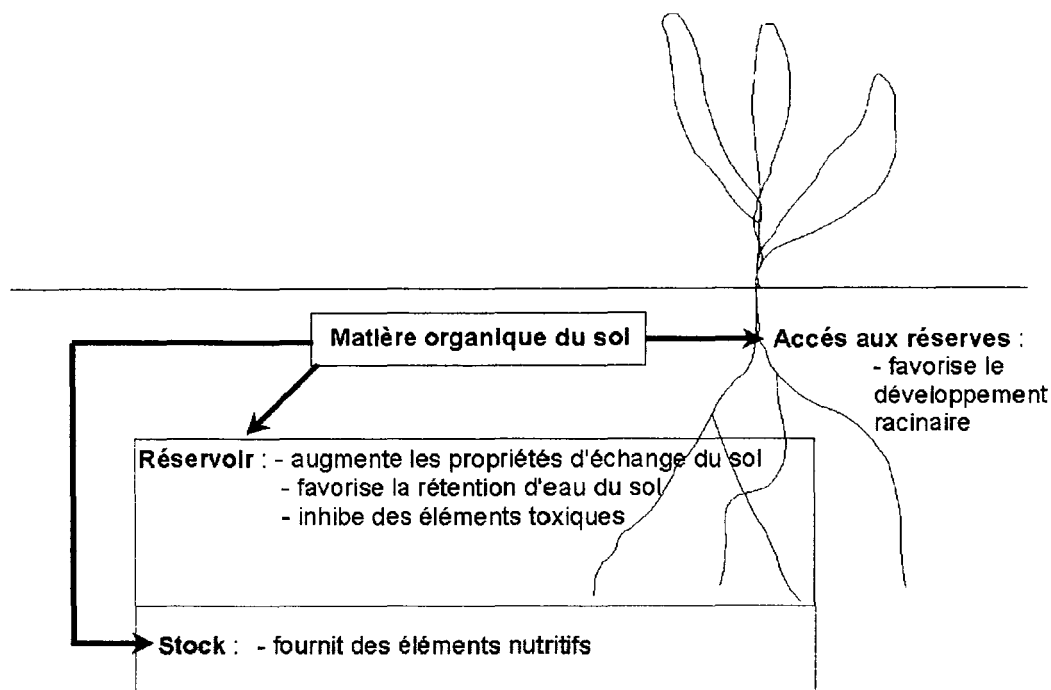


Figure 1 : représentation des principales fonctions de la matière organique des sols.

apportant aux plantes uniquement les éléments minéraux, l'eau, le CO_2 et l'énergie lumineuse qui leurs sont nécessaires. Cependant, en culture traditionnelle, la MOS va faciliter cette fourniture d'éléments nécessaires aux plantes par plusieurs actions (figure 1).

Un premier rôle de la MOS est de participer à la fonction de réservoir du sol en éléments indispensables aux plantes : la MOS contribue à la constitution de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols et cette contribution est primordiale dans les sols tropicaux à argiles de type kaolinique à faible activité d'échange (Fallavier, 1995). Elle va donc permettre d'augmenter la capacité du sol à contenir les cations nécessaires (K, Mg, Ca, Na) aux plantes sous une forme facilement assimilable par elles. Par son action sur la porosité du sol, la MOS permet également d'augmenter la réserve utile du sol en eau, facilement disponible pour les plantes, bien que l'impact de cette action reste relativement modeste (Sébillote, 1980).

Le second rôle de la MOS est de remplir ce même réservoir en libérant par sa minéralisation des éléments nécessaires aux plantes. C'est le cas pour l'azote puisée par les plantes qui, même en cas d'apports importants par les engrais, provient en grande partie de la MOS minéralisée (Machet, 1987 ; Ganry, 1990). La contribution de la MOS à la fourniture en K et P

notamment a pu également être démontrée (Gachon, 1988).

Enfin, la MOS va également intervenir dans la fonction d'accès de la plante aux éléments contenus dans le réservoir sol. Par ses actions biologiques, physiques et chimiques, la MOS concoure à un meilleur développement des racines des plantes (Cisse, 1985), améliorant ainsi leur capacité à extraire du réservoir sol les éléments dont elle a besoin. La MOS joue également un rôle dans la séquestration d'ions susceptibles d'être toxiques pour les plantes.

Ces différentes fonctions proviennent soit de la présence de la MOS en tant que constituant du sol, soit de sa minéralisation, donc de sa disparition du sol. Le rôle de la MOS au niveau de la CEC du sol ou celui de l'agrégation des constituants du sol relèvent de la première catégorie de fonctions. La fourniture d'éléments aux plantes ou l'activation de la vie biologique du sol sont des fonctions de la MOS découlant de sa minéralisation. La gestion de la MOS va donc consister à équilibrer stockage et minéralisation, en fonction des propriétés du sol à améliorer.

En raison du caractère non indispensable de la MOS pour la production végétale et de la multiplicité des propriétés du sol sur lesquelles elle joue un rôle, la définition de seuil du taux de MOS en dessous duquel la production des cultures ne peut plus atteindre un niveau acceptable est rendue délicate. La définition d'un tel seuil dans un contexte donné est liée à la propriété du sol limitant la production et sur laquelle le taux de MOS a un impact. Ce seuil de MOS sera alors valable pour cette fonction précise de la MOS et ne s'appliquera pas forcément dans un autre contexte. Pour certains systèmes de production, les mauvaises propriétés physiques du sol peuvent constituer le facteur limitant de la production agricole, alors que pour d'autres, la fourniture en azote des plantes sera le facteur limitant. Dans les deux cas, la MOS peut améliorer la propriété du sol déficiente, mais le niveau de MOS permettant de lever chacune des deux contraintes sera différent.

Une autre particularité de la MOS est d'être un ensemble constitué d'un nombre très élevé d'éléments différents par leur taille, leur origine, leur composition chimique et leur durée de vie dans le sol. Chacun de ces éléments va contribuer de façon spécifique aux différentes fonctions de la MOS. Savoir comment préserver la fertilité des sols nécessite de déterminer les éléments de la MOS qui contribuent majoritairement à chacune des propriétés de sol évoquées et mesurer l'impact de différentes gestions de sols sur leur durée de vie dans les sols. En raison du grand nombre d'éléments de la MOS, cette étude ne peut s'effectuer que par la recherche de

Tableau 1 : les principaux fractionnements de la matière organique des sols.

Types de fractionnement	Nature du fractionnement	Intérêts	Principaux inconvénients
Extraction des substances humiques : acides humiques, acides fulviques et humine	Chimique : extraction à la soude diluée, diverses méthodes de fractionnement, la principale étant la solubilité dans des solutions de différents pH)	Les fractions se caractérisent par des poids moléculaires différents. Nombreux travaux sur la composition chimique des fractions humiques	Origines des fractions diverses et mal connues. Peu de relations mises en évidence entre mode de culture et importance des différentes fractions.
Fractionnement densimétrique : matière organique liée et libre	Physique : utilisation de liqueurs organiques denses	Origine et cinétique des fractions spécifiques. Mises en évidence d'impacts des conduites culturelles sur l'importance des fractions	Contamination des fractions par la solution dense utilisée
Hydrolyse acide de l'azote : N non hydrolysable (Nnh) N hydrolysable distillable (Nhd) N hydrolysable non distillable (Nhnd)	Chimique	Séparation des fractions de N du sol en fonction de leur catégorie chimique, avec une mise à disposition de N aux plante spécifique	Méthode destructive. Pas de vérifications possibles (Nhnd obtenu par différence). Importance des fractions dépendante du mode opératoire, difficilement reproductible
Fractionnement granulométrique de la matière organique du sol	Destruction des liaisons matière organique-minéraux par agents chimique et/ou physique (dispersants, billes, ultrasons). Tri selon la taille	Fractions concrètes. Possibilité de vérifications. Fractions se caractérisant par leur origine, leur cinétique et leur fonction. Mises en évidence d'impacts des conduites culturelles sur l'importance des fractions	Méthode de séparation longue à mettre en oeuvre et délicate. Phase de destruction des agrégats à adapter au type de sol. Artefact possibles pendant celle-ci.

compartiments de MOS suffisamment homogènes et spécifiques quant à leur cinétique et fonctionnalité. La recherche de tels compartiments s'est dans un premier temps basée sur un tri effectué à partir des propriétés chimiques des constituants de la MOS. Les différentes solubilités de constituants de la MOS dans les acides et les bases permettent d'isoler les acides fulviques, acides humiques et humine. Mais on considère maintenant que ces compartiments sont peu homogènes du point de vue de leur cinétique (Balesdent, 1997). Les tris opérés sur des propriétés physiques des constituant de la MOS tel la densité ou la taille s'avèrent plus opérationnels (tableau 1).

La mise en évidence d'un seuil de teneur en MOS en dessous duquel la production de parcelles de cotonnier n'est plus conforme aux objectifs des agriculteurs est recherchée dans un premier temps dans le bassin cotonnier du Tchad, en milieu réel. On cherchera ensuite à relier la variabilité de teneur en MOS observée en milieu réel aux cinétiques de MOS observés ou prévues par le modèle de Hénin-Dupuis sur des essais de longue durée en station. La cinétique des différentes fractions granulométriques de la MOS est ensuite prise en compte et l'impact des amendements organiques sur ces différentes fractions est déterminé. Par la mesure de la contribution de ces différentes fractions à la CEC du sol, on obtient alors les éléments permettant de caractériser la fonction d'échange de la MOS, de déterminer l'évolution de cette propriété de sol sous culture et de mesurer la capacité de techniques culturales appropriées, telle l'apport de fumier ou de compost, à la maintenir à un niveau compatible avec la production souhaitée.

Chapitre 1
Approche spatiale des
relations entre
productivité et teneur
en carbone des sols : le
cas du bassin cotonnier
du Tchad

Chapitre 1

Approche spatiale des relations entre productivité et teneur en carbone des sols : le cas du bassin cotonnier du Tchad

1.1. Introduction

La culture du cotonnier est pratiquée au Tchad au sud du 10^{ème} parallèle dans la zone la plus arrosée et la plus peuplée du pays. Le climat est selon la classification d'Aubreville (1949) de type soudanien avec des précipitations annuelles moyennes allant du nord au sud de la zone de 800 à 1200 mm an⁻¹ réparties sur une saison de 5 à 7 mois. La plupart des terres cultivées appartient aux sols ferrugineux et ferrallitiques (Pias, 1970 ; Ségalen 1995). Ils sont sableux en surface, plus argileux en profondeur, faciles à travailler, souvent profonds mais leurs propriétés chimiques sont généralement médiocres.

Les cinq préfectures concernées par la culture du cotonnier ont une superficie d'environ 134 000 km² soit 10% du territoire national et comptent environ 84 000 km² de terres cultivables en pluvial (Ehrwein, 1976). La population, estimée en 1993 à près de trois millions d'individus (Beauvillain, 1993) double environ tous les 25 ans¹. Sur la base d'une superficie cultivée par habitant de 44 ares (Raymond *et al.* 1990), on peut estimer à 15% les terres cultivables exploitées en 1993. Ce ratio, même si certaines terres ne peuvent être mises en valeur en raison de l'inexistence de points d'eau facilement exploitables, permet la pratique de jachère sur une grande partie de la zone. Une projection de ces chiffres indique qu'en 2075 l'ensemble des terres cultivables sera cultivé de façon continue, sans possibilité de recours à la jachère. Cette situation prévaut déjà dans les sous-préfectures qui connaissent une densité de population proche de 75 habitants km⁻² (Bénoye, Moundou). Le passage de la culture itinérante à la culture continue s'effectue sans autre modification du système de culture qui se caractérise par un faible recours

¹ Selon l'auteur cité, les préfectures du Moyen Chari, Logone Oriental, Logone Occidental, Mayo-Kebbi et de la Tandjilé comptaient 2 919 000, 936 000 et 458 000 habitants en 1993, 1949 et 1926 respectivement.

aux intrants : seule la culture de cotonnier, soit 30% de la sole cultivée, reçoit en moyenne régionale 53 kg ha⁻¹ d'engrais minéral (Raymond, 1992) ne compensant qu'un tiers des exportations d'éléments minéraux de la culture (Mégie et Ehrwein, 1976). L'utilisation de fumures organiques est une pratique peu courante. Les bilans minéraux et organique des parcelles sous culture sont négatifs. Les rendements en coton-graine sont faibles comparés à ceux obtenus dans d'autres pays de la Zone Franc et les rendements des cultures vivrières permettent à peine d'assurer l'autosuffisance alimentaire (Guibert, 1993).

Siband (1974), Richard et Djoulet (1985) ont montré que dans de telles conditions, la baisse du taux de matière organique du sol (MOS), fonction du nombre d'années depuis la défriche, était la cause principale de la baisse de la fertilité. Pieri (1989) établit un indice du sol de propension à la déstructuration physique mettant en jeu la MOS. Feller (1995 a) propose également un indice de durabilité des systèmes faisant intervenir la MOS.

L'objectif de cette étude est d'établir un diagnostic de la dégradation de la fertilité des sols dans cette région et d'en déterminer les mécanismes principaux, notamment d'identifier les relations entre productivité des sols et teneur en MOS.

1.2. Matériel et méthodes

1.2.1. Sols cultivés du bassin cotonnier du Tchad

Le bassin cotonnier du Tchad se situe en bordure sud de la cuvette tchadienne, limitée par le socle cristallin antécambrien qui apparaît sous forme de relief accusé à la frontière avec la République centrafricaine (massif de Bocaranga). Celui-ci a donné naissance aux sédiments détritiques d'âge tertiaire du Continental Terminal qui est la formation principale du bassin cotonnier. Dans les plaines alluviales, au nord du bassin, se sont déposées des alluvions fluviales du Quaternaire. La majeure partie du paysage est formée de vastes mamelons d'une altitude relative d'une trentaine de mètres dénommés localement "koros". Aux sols ferrallitiques du sommet succèdent des sols ferrugineux à hydromorphie plus ou moins marquée avec localement présence de cuirasse à profondeur variable sur les versants puis des sols hydromorphes en bas de toposéquence. Les sols les plus cultivés sont les "sols beiges" de type ferrugineux. Les "sols rouges" appartenant selon les auteurs aux sols ferrallitiques ou ferrugineux sont moins

systématiquement mis en culture, essentiellement en raison de la difficulté pour établir des villages sur ces parties du territoire où l'approvisionnement en eau est difficile.

1.2.2. Principe du diagnostic

Le principe du diagnostic repose sur l'hypothèse de la coexistence dans la région étudiée de parcelles dont l'état de fertilité correspond aux différentes étapes du processus d'évolution de fertilité. Les rendements de ces parcelles sont ainsi mis en relation avec les indicateurs d'état de fertilité de sols (Crétenet, 1995). Les processus d'évolution de sols sont ensuite déterminés grâce au repérage des variables caractérisant le sol les mieux corrélées aux variations de rendement, en référence aux travaux issus d'observations de sols sous culture (Debaeke *et al.*, 1996). La culture de cotonnier se prête bien à cette étude car la même variété est utilisée dans l'ensemble de la région. Afin d'analyser les relations entre caractéristiques du sol et rendement observé, il faut aussi prendre en compte les variations de rendement dues aux variations des pratiques culturales réalisées sur les parcelles et aux variations des conditions climatiques sur les différents sites.

Deux méthodes d'analyse des données sont utilisées pour la détermination des facteurs limitants les rendements observés : les régressions linéaires multiples progressives et les courbes enveloppes.

La régression linéaire multiple progressive permet de repérer pas à pas les variables les mieux corrélées au rendement. Les variables qui n'apportent pas d'"explication" supplémentaire significative par rapport aux régressions déjà obtenues ne sont pas retenues ou éliminées. On peut espérer par cette méthode connaître le poids de chaque variable dans l'explication des variations de rendements observés. Cependant, l'efficacité de cette méthode est conditionnée par la non-corrélation entre elles des variables explicatives. Le grand nombre d'observations de l'enquête (456 parcelles observées) permet ici d'introduire un nombre important de variables explicatives en respectant le ratio requis entre le nombre d'observations et le nombre de variables explicatives.

Le principe de la courbe enveloppe, développé par Webb (1972) et utilisé par Navarro (1984) consiste pour un nuage de points XY donné, de n'attribuer qu'aux seuls points supérieurs la relation fonctionnelle entre X et Y. Les autres points sont supposés être le résultat non pas de cette fonction entre X et Y, mais de l'action d'autres facteurs limitants (Z1, Z2, ...). L'interprétation de la courbe enveloppe se réfère ensuite à l'utilisation du modèle de compétition

décrit par Fleury (1990). Un plateau détermine les valeurs de X qui, dans le milieu considéré, n'affecte pas la valeur Y. En dessous d'une valeur seuil de X, Y est alors une fonction décroissante de X qui devient facteur limitant. Chaque variable dans ce cas peut être étudiée indépendamment des autres.

Ces deux méthodes permettent de mettre en évidence des corrélations entre variables et donc de déterminer des indicateurs de productivité de la culture. Elles n'établissent pas cependant des modèles d'élaboration du rendement à partir des variables "explicatives". Le terme "explication" utilisé en statistique peut prêter à confusion : une variable peut être corrélée et ainsi "expliquer" en terme statistique une part de la variation de rendement sans pour autant intervenir dans une fonction d'élaboration de ce rendement : cette variable peut être seulement corrélée à une autre variable dont le rendement sera fonction. Ce n'est donc que par référence à des expérimentations sur l'évolution de sols et de la production dans des conditions analogues qu'on peut déterminer si les indicateurs déterminés ont une fonction dans l'élaboration du rendement.

1.2.3. Dispositif

Le diagnostic est réalisé en 1994, sur un essai de fertilisation potassique de culture cotonnière conduit dans six villages, cartographiés en figure 2, représentatifs des principaux environnements socio-économiques du bassin cotonnier (Ngamine *et al.* 1994 ; Guibert et Ngamine, 1996), résumés dans le tableau 2. L'essai est implanté chez vingt à trente agriculteurs de chaque village, afin de couvrir l'éventail des conditions de sols existantes.

La culture est conduite par l'agriculteur à qui on demande de respecter les recommandations vulgarisées par l'encadrement agricole sur la culture du cotonnier, afin de limiter l'impact de pratiques culturelles trop hétérogènes sur le rendement. L'application des doses d'engrais, objet de l'étude, et les traitements insecticides sont réalisés de façon systématique par le responsable de l'essai. Chacun des essais est disposé sur une partie d'une parcelle de cotonnier d'un agriculteur. Il compare dans un dispositif en blocs de Fisher avec deux répétitions et quatre doses d'apport de sulfate de potassium en progression arithmétique :

D0 : pas d'apport

D1 : 40 kg ha⁻¹ soit 19,2 kg ha⁻¹ de K₂O (la fumure vulgarisée sur cotonnier au Tchad apporte 19 kg ha⁻¹ K₂O)

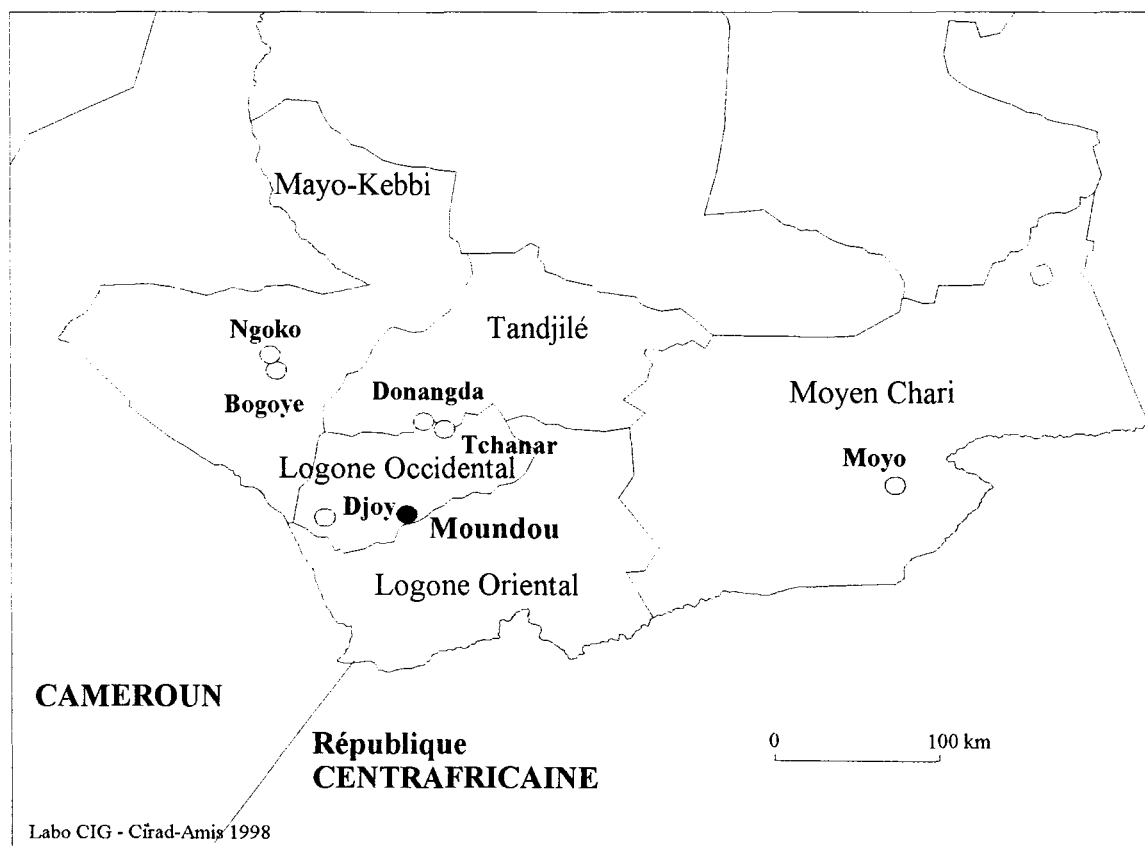
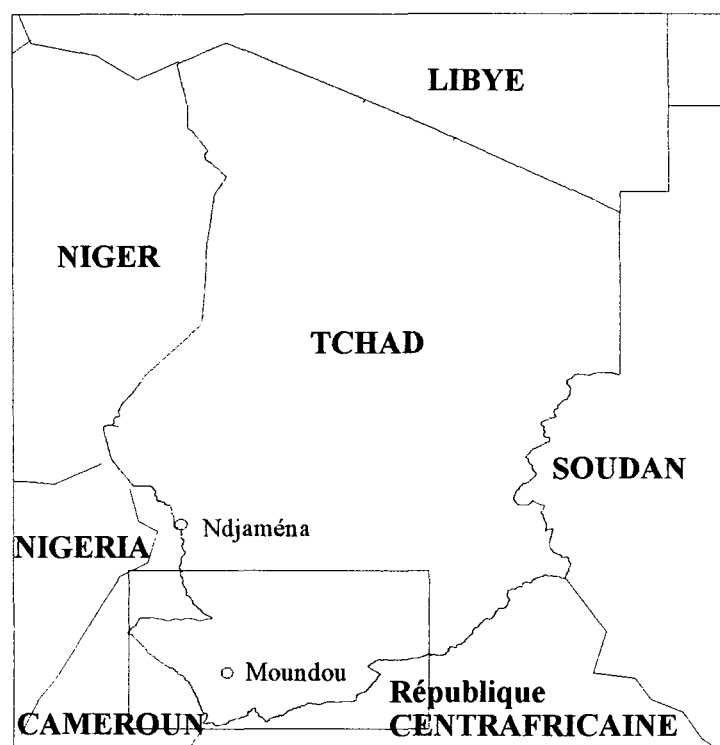


Figure 2 : localisation des villages du diagnostic agronomique, année 1994.

Tableau 2 : localisation et contexte socio-économique des villages du diagnostic agronomique (Tchad, 1994).

Village	Localisation	Contexte socio économique
Tchanar	Préfecture du Logone Occidental, Sous-Préfecture de Bénouye	Forte densité de population, terroir saturé. Elevage sédentaire faible, zone de passage d'élevage transhumant. Végétation ligneuse rare, tapis herbacé peu fourni, feux de brousse absents. Erosion localement marquée. Présence d'affleurements de cuirasse.
Donangda	Préfecture de la Tandjilé, Sous-Préfecture de Kélo	Analogue à Tchanar, mais pas de zone d'affleurements de cuirasse, passages de troupeaux transhumant moins fréquents et érosion présente, mais moins marquée.
Ngoko	Préfecture du Mayo-Kebbi, Sous-Préfecture de Gounou-Gaya	Densité de population moyenne, possibilité de jachère. Elevage sédentaire assez important et sédentarisation d'éleveurs transhumants se convertissant à la culture. Erosion localement présente.
Bogoye	Préfecture du Mayo-Kebbi, Sous-Préfecture de Pala	Densité de population moyenne, possibilités de jachères. Elevage sédentaire très important mais sans réelles intégration avec l'agriculture. Quelques éleveurs sédentarisés, mais pas de passage de troupeaux transhumants. Peu d'érosion.
Djoy	Préfecture du Logone Occidental, Sous-Préfecture de Tapol	Densité de population faible, village de migrants avec un libre accès aux terres. Zone boisée, peu d'érosion. Passages de troupeaux transhumants.
Moyo	Préfecture du Moyen Chari, Sous-Préfecture de Sarh	Densité de population faible, possibilités de jachères. Présence d'un élevage sédentaire, et pression importante de l'élevage transhumant (passage et séjour)

D2 : 80 kg ha⁻¹

D3 : 120 kg ha⁻¹

Chaque parcelle élémentaire est constituée de quatre lignes de cotonnier de 15 m de longueur. La parcelle utile est formée de deux lignes de 15 m. Les interlignes sont mesurés après la levée pour déterminer la surface exacte de la parcelle élémentaire. Cette surface sert aux calculs des apports d'engrais, de la densité du peuplement et du rendement. La surface totale de chaque

essai est d'environ 350 m².

Sur cinq villages, une partie de ces essais fait l'objet d'un prélèvement de sol sur les profondeurs 0-10 et 10-20 cm. Un échantillon de sol de chaque profondeur est constitué à partir du mélange de trois prélèvements effectués sur le témoin de la première répétition de l'essai. Les analyses portent sur la granulométrie, la matière organique, P assimilable, le complexe absorbant et le pH. Les techniques culturales sont répertoriées et la densité de plants à la récolte mesurée. La pluviométrie journalière est relevée sur chaque village.

Seuls les 57 essais ayant fait l'objet d'un prélèvement de sol sont inclus dans le diagnostic. A chaque analyse de sol correspondent huit parcelles et huit rendements, avec des techniques culturales différentes (densités, doses d'engrais).

1.2.4. Mesures réalisées

Douze variables décrivent les techniques culturales accomplies sur les parcelles. La plupart sont des dates de réalisation des opérations culturales. L'ensemble des parcelles a été labouré, sarclé au moins deux fois et démarié. Aucune parcelle n'a reçu d'herbicide. La protection phytosanitaire comporte pour toutes les parcelles le double de traitements de ce qui est vulgarisé. Qualifiée de protection "plafond", elle doit assurer une protection pratiquement totale contre les ravageurs du cotonnier. Les principales variations sur les itinéraires techniques proviennent donc des dates de réalisation des principales opérations. Ces dates ont été transformées en délais de réalisation de l'opération, comptés soit en nombre de jours à partir de la date de la réalisation la plus précoce pour l'ensemble des parcelles suivies pour le labour, le semis et la levée, soit à partir de la date de semis pour les premier et second sarclages, le démariage, l'épandage d'engrais, le début des traitements insecticides et la récolte. Le nombre de sarclages, la dose d'engrais et la densité à la récolte complètent les données relevées.

A partir du relevé de pluviométrie journalière, de la moyenne décennale de l'évapotranspiration potentielle pentadaire régionale et des dates de semis, des taux de satisfaction des besoins en eau des cultures ont été calculés (Franquin et Forest, 1977) avec le logiciel Sarra (Reyniers *et al.*, 1997) pour chaque essai. Ces taux de satisfaction en eau, rapport de ETR/ETM², expliquent bien la production des parcelles des céréales, particulièrement ceux correspondant au

²ETR = Evapo-transpiration réelle ; ETM = Evapo-transpiration maximale

début de cycle et à la phase de remplissage du grain (Forest et Lidon, 1984 ; Forest et Clopes, 1994). Pour le cotonnier, plante à croissance indéterminée, quatre phases du cycle ont été retenues : développement végétatif, floraison, capsulaison et maturation. La pluviométrie de l'année 1994 ayant été abondante, ces taux de satisfaction hydrique sont identiques et proches du maximum pour les phases floraison et capsulaison pour toutes les parcelles. Aussi, n'ont été retenus que les taux de satisfaction hydrique correspondant à la première et dernière phase du cycle de culture qui présentent une certaine variabilité.

Trente variables sont issues directement des analyses de sol : teneurs en argile, limon fin, limon grossier, sable fin, C total, N total, P assimilable (Olsen), bases échangeables (Ca, Mg, K, Na), Mn échangeable, Al échangeable, H échangeable ; CEC, pH eau et pH KCl pour le prélèvement de sol de profondeur 0-10 cm et les mêmes variables pour le prélèvement de sol de profondeur 10-20 cm exceptée la granulométrie. Dix variables calculées à partir des précédentes sont également introduites : rapports d'éléments assimilables ou échangeables, toxicité aluminique, C/N, taux de saturation en base échangeable, matière organique/argile+limon et C/argile+limon fin.

1.2.5. Méthodes d'analyses de sols

Ces analyses ont été réalisées par les laboratoires du CIRAD à Montpellier. La granulométrie en cinq fractions est réalisée sur granulomètre automatique "Granulostat" selon le principe de la norme AFNOR X 31-107 (AFNOR, 1987). Les teneurs en C et N totaux sont déterminées par voie sèche sur analyseur automatique LECO CHN 600. La teneur en P assimilable est déterminée par la méthode Olsen modifiée Dabin. Le complexe d'échange est analysé en utilisant comme ion échangeur le chlorure de cobaltihexamine. Cette méthode permet la détermination de la capacité d'échange cationique au pH du sol (Fallavier *et al.*, 1985).

1.3. Résultats

1.3.1. Moyenne et variabilité des observations réalisées (tableau 3)

Le rendement moyen des parcelles observées est de 1245 kg ha⁻¹ de coton-graine avec une

Tableau 3 : moyennes et écarts types des principales mesures et observations du diagnostic agronomique réalisé au Tchad en 1994.

	Tchanar	Donangda	Ngoko	Bogoye	Djoy	Moyo	Ensemble
Nombre essais	30	24	22	30	21	30	157
Nombre essais du diagnostic	15	9	9	15	9	0	57
<u>Moyenne et écart-type du rendement en coton-graine (kg ha⁻¹)</u>							
Ensemble essais	594	797	1267	1697	1409	1056	1127
Essais du diagnostic	725 (492)	964 (493)	1115 (385)	1808 (423)	1583 (381)	-	1245 (618)
<u>Moyenne et écart-type des principales variables sol, profondeur 0-10 cm</u>							
Argile g 100 g ⁻¹	10,7 (3,1)	4,5 (1,2)	4,7 (2,2)	9,5 (2,2)	6,1 (1,1)	-	7,7 (3,4)
C total g kg ⁻¹	29 (5)	32 (12)	31 (6)	55 (12)	48 (4)	-	40 (14)
N total g kg ⁻¹	3,0 (0,5)	3,0 (0,9)	3,3 (0,6)	4,6 (0,9)	4,4 (0,6)	-	3,7 (1,0)
P assimilable Olsen mg kg ⁻¹	12,0 (5,2)	30,2 (27,5)	18,7 (11,6)	13,6 (7,9)	24,1 (18,7)	-	18,3 (15,7)
K éch. cmol _c kg ⁻¹	0,09 (0,05)	0,13 (0,05)	0,12 (0,03)	0,12 (0,03)	0,16 (0,06)	-	0,12 (0,05)
Ca éch. cmol _c kg ⁻¹	1,15 (0,32)	1,41 (0,58)	1,47 (0,31)	2,65 (0,57)	1,88 (0,37)	-	1,75 (0,75)
Mg éch. cmol _c kg ⁻¹	0,32 (0,07)	0,37 (0,12)	0,33 (0,06)	0,60 (0,11)	0,55 (0,15)	-	0,44 (0,16)
CEC* cmol _c kg ⁻¹	1,8 (0,4)	2,0 (0,7)	2,1 (0,3)	3,5 (0,6)	2,7 (0,4)	-	2,5 (0,9)
pH eau	6,0 (0,4)	6,7 (0,3)	6,5 (0,2)	6,5 (0,2)	6,9 (0,9)	-	6,5 (0,4)
MO/(A+L)** %	2,6 (0,6)	4,9 (1,8)	3,2 (1,2)	3,5 (0,6)	6,9 (0,9)	-	4,0 (1,8)
C/(A+Lf)***	0,20 (0,05)	0,44 (0,17)	0,37 (0,14)	0,34 (0,06)	0,53 (0,07)	-	0,35 (0,15)

Chiffres entre parenthèses : écart-type de la moyenne. * réactif utilisé : chlorure de cobaltihéxamine. ** indice de stabilité structurale des sols (Pieri, 1989) : rapport $C \times 1,72$ (g 100 g⁻¹) sur somme argile et limon (g 100 g⁻¹) $\times 100$. *** indice de durabilité des systèmes de culture (Feller, 1995) : rapport C (g kg⁻¹) sur somme argile et limon fin (g 100 g⁻¹)

Tableau 3 : (suite).

	Tchanar	Donangda	Ngoko	Bogoye	Djoy	Moyo	Ensemble
<u>Moyenne et écart-type des principales variables sol, profondeur 10-20 cm</u>							
C total	23	20	25	43	26	-	28
g kg ⁻¹	(4)	(8)	(6)	(10)	(4)		(11)
N total	3,2	2,1	2,4	3,9	2,8	-	3,0
g kg ⁻¹	(0,3)	(0,8)	(0,5)	(1,0)	(0,6)		(0,9)
P assimilable	8,3	7,4	7,4	9,1	11,0	-	8,7
Olsen mg kg ⁻¹	(2,0)	(3,7)	(4,6)	(6,9)	(4,9)		(5,1)
K éch.	0,06	0,10	0,08	0,07	0,09	-	0,08
cmol _c kg ⁻¹	(0,02)	(0,06)	(0,03)	(0,01)	(0,03)		(0,03)
Ca éch.	1,14	1,04	1,41	2,47	0,91	-	1,48
cmol _c kg ⁻¹	(0,24)	(0,70)	(0,30)	(0,61)	(0,24)		(0,77)
Mg éch.	0,34	0,30	0,33	0,58	0,39	-	0,40
cmol _c kg ⁻¹	(0,07)	(0,16)	(0,04)	(0,12)	(0,10)		(0,15)
CEC cmol _c kg ⁻¹	2,0	1,5	2,0	3,2	1,5	-	2,2
	(0,3)	(0,9)	(0,3)	(0,7)	(0,3)		(0,9)
pH eau	6,0	6,4	6,3	6,3	6,5	-	6,3
	(0,3)	(0,3)	(0,3)	(0,2)	(0,3)		(0,3)
<u>Moyenne et écart-type des taux de satisfaction des besoins en eau des cultures</u>							
Phase	88,7	90,4	93,3	92,3	92,2	-	91,2
végétative ¹	(0,6)	(0,7)	(0,5)	(0,9)	(0,7)		(1,9)
Phase de	92,1	76,7	88,9	91,8	94,1	-	89,4
maturation ²	(1,3)	(9,0)	(0,9)	(1,3)	(0,8)		(6,8)
<u>Moyenne écart-type des observations sur les pratiques culturales</u>							
Date de levée ³	10,6	20,2	14,4	11,9	5,0	-	12,2
	(3,1)	(4,2)	(1,7)	(3,3)	(4,7)		(5,6)
Nombre de	2,1	2,6	3,1	4,9	4,8	-	3,5
désherbage	(0,3)	(0,5)	(0,3)	(0,4)	(0,4)		(1,3)
Date de	126,5	135,7	129,8	157,3	164,3	-	142,5
récolte ⁴	(7,1)	(9,1)	(3,9)	(4,5)	(7,7)		(16,6)
Densité (x1000	55,9	58,1	67,8	49,3	50,7	-	55,3
plants ha ⁻¹)	(12,7)	(12,2)	(9,9)	(12,1)	(8,2)		(13,0)

¹ phase végétative : avant induction florale, entre le semis et 30 jours après le semis. ² phase de maturation des capsules : entre les 90 et 120^{ème} jours après le semis. ³ nombre de jours après le 03/06/1994. ⁴ nombre de jours après le semis.

variabilité importante, l'écart-type étant de 618 kg ha⁻¹.

Le prélèvement de surface (0-10 cm) fait état d'un sol peu argileux et pauvre en matière organique. Le niveau de K échangeable et la capacité d'échange cationique (CEC) sont faibles.

Le niveau moyen du P assimilable est correct, mais cette moyenne cache de fortes variations. Les sols sont faiblement acides. Les valeurs des caractéristiques chimiques du prélèvement 10-20 cm sont moins élevées pour les teneurs en C, N, K échangeable, P assimilable et la CEC notamment. La variabilité de ces observations est très importante pour le taux d'argile, les teneurs en P assimilable, Ca échangeable et la CEC, importante pour la teneur en C, N, K et Mg échangeables et plus faible pour le pH.

IP, indice de susceptibilité du sol à la déstructuration physique défini par Pieri (1989) comme le pourcentage du rapport de la matière organique du sol (MOS) sur la somme du taux d'argile et de limon et IF, indice de durabilité des systèmes de culture défini par Feller (1995 a) comme le rapport du C du sol sur la somme du taux d'argile et limon fin ont été calculés pour l'horizon 0-10 cm. IP est en moyenne inférieure au seuil de 5% caractérisant des sols déstructurés physiquement et présentant un risque d'érosion élevé. IF est en moyenne proche du seuil défini par l'auteur comme valeur en dessous de laquelle la durabilité des systèmes de culture n'est plus assurée.

La pluviométrie de l'année 1994 a été abondante comme l'indiquent les moyennes des taux de satisfaction hydrique calculés et leur faible variabilité.

Les moyennes et la variabilité des observations sur les pratiques culturales montrent que les agriculteurs ont bien respecté les recommandations techniques vulgarisées sur les parcelles d'essais.

1.3.2. Résultats par village (tableau 3)

Les deux villages qui connaissent une saturation foncière de leur terroir, Tchanar et Donangda, affichent les rendements moyens les plus faibles et une variabilité par rapport à cette moyenne la plus importante. Le village de Djoy, situé sur un front pionnier et celui de Bogoye ont les rendements les plus élevés. La teneur en C, N, en K, Ca, Mg échangeables et la CEC des sols sont plus faibles pour les deux premiers villages. La variabilité de ces caractéristiques reste importante au sein de chaque village notamment pour C, N et K où elle est de même ordre de grandeur que pour l'ensemble des parcelles. La différence entre villages pour les taux de satisfaction hydrique est peu marquée. On note seulement pour Donangda des levées plus tardives avec en fin de cycle une moins bonne satisfaction des besoins en eau du cotonnier. Les pratiques

culturelles apparaissent différentes d'un village à l'autre notamment en ce qui concerne le nombre de désherbages et les dates de levée et de récolte.

1.3.3. Régressions linéaires du rendement en fonction des variables observées

Les régressions multiples pas à pas du rendement effectuées séparément en fonction de chacune des trois catégories de variables (climat, sol, opérations culturales) donnent les résultats suivants (figure 3) :

- nombre de variables climat entrées : deux (taux de satisfaction hydrique des cultures, phases 1 et 4), $r^2 = 0,26$,
- nombre de variables sol entrées : cinq (du prélèvement 0-10 cm : CEC, K et H échangeables, pH KCl, P assimilable), $r^2 = 0,53$
- nombre de variables culturales entrées : quatre (nombre de désherbages, délais de levée et de récolte, densité), $r^2 = 0,51$.

La régression multiple pas à pas du rendement en fonction de l'ensemble des variables observées donne le résultat suivant :

- nombre de variables entrées : onze (les mêmes que celles entrées par catégorie de variables), $r^2 = 0,66$.

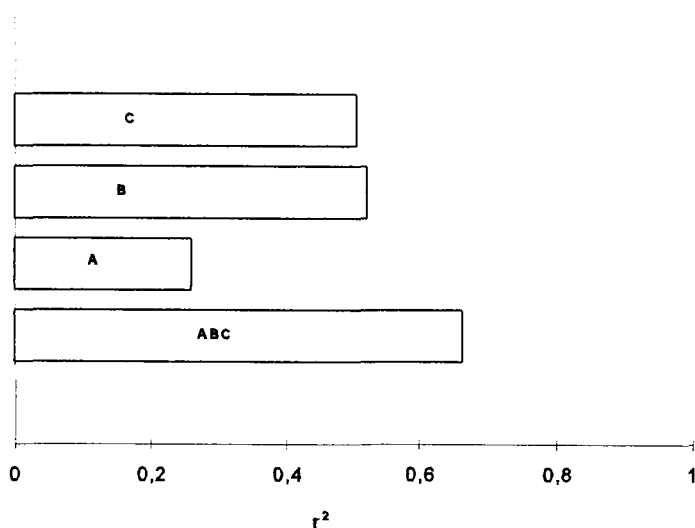


Figure 3 : part d'explication de la variabilité des rendements observés par une fonction linéaire des variables climat (A), sol (B), opérations culturales (C) et de l'ensemble des trois catégories variables.

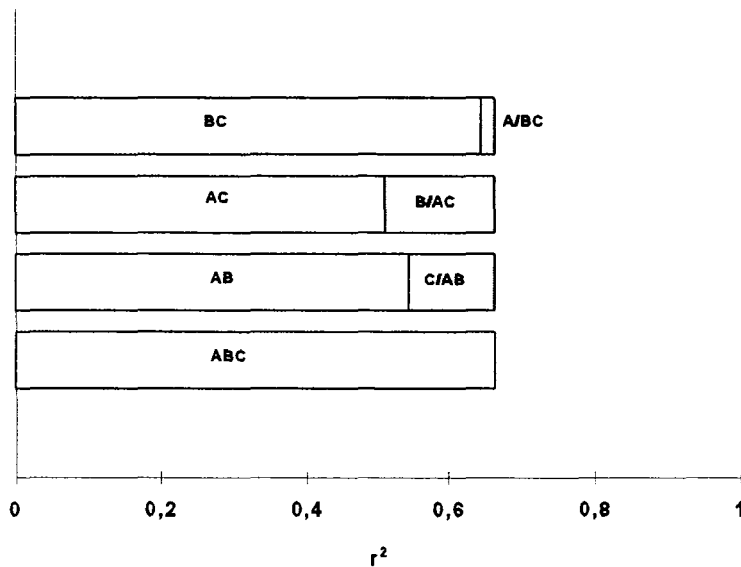


Figure 4 : part d'explication supplémentaire de la variabilité des rendements mesurés apportée par chaque catégorie de variable (exemple C/AB) par rapport à celles apportées par les deux autres catégories (exemple : AB).

La somme des coefficients de régression faisant intervenir chaque catégorie de variable est très supérieure au coefficient de régression correspondant à l'ensemble des variables entrées simultanément. Il y a donc une importante redondance des explications fournies par les différentes catégories de variables. Ceci s'explique par le fait que ces catégories de variables sont fortement corrélées entre elles. On peut estimer une borne inférieure de ce que chaque catégorie de variables apporte en propre comme part d'explication du rendement par l'introduction de celles-ci après les deux autres catégories (figure 4). On obtient alors :

- variables climat : augmentation du r^2 de 0,02 après introduction des deux autres catégories de variables,
- variables sol : augmentation du r^2 de 0,15 après introduction des deux autres catégories de variables,
- variables culturales : augmentation du r^2 de 0,12 après introduction des deux autres catégories de variables.

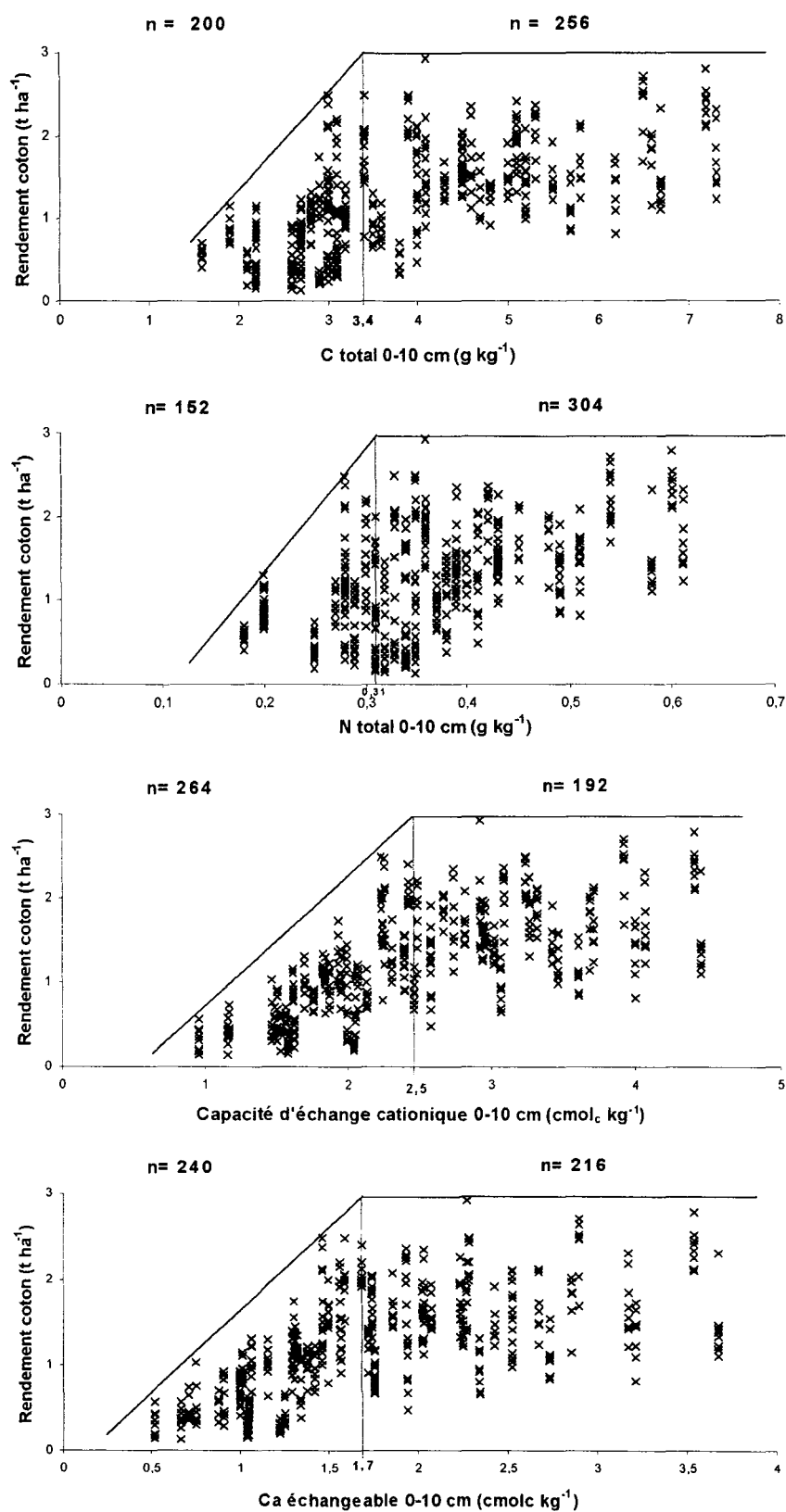


Figure 5 : relations entre rendement et caractéristique physico-chimique des sols (diagnostic agronomique, Tchad, 1994).

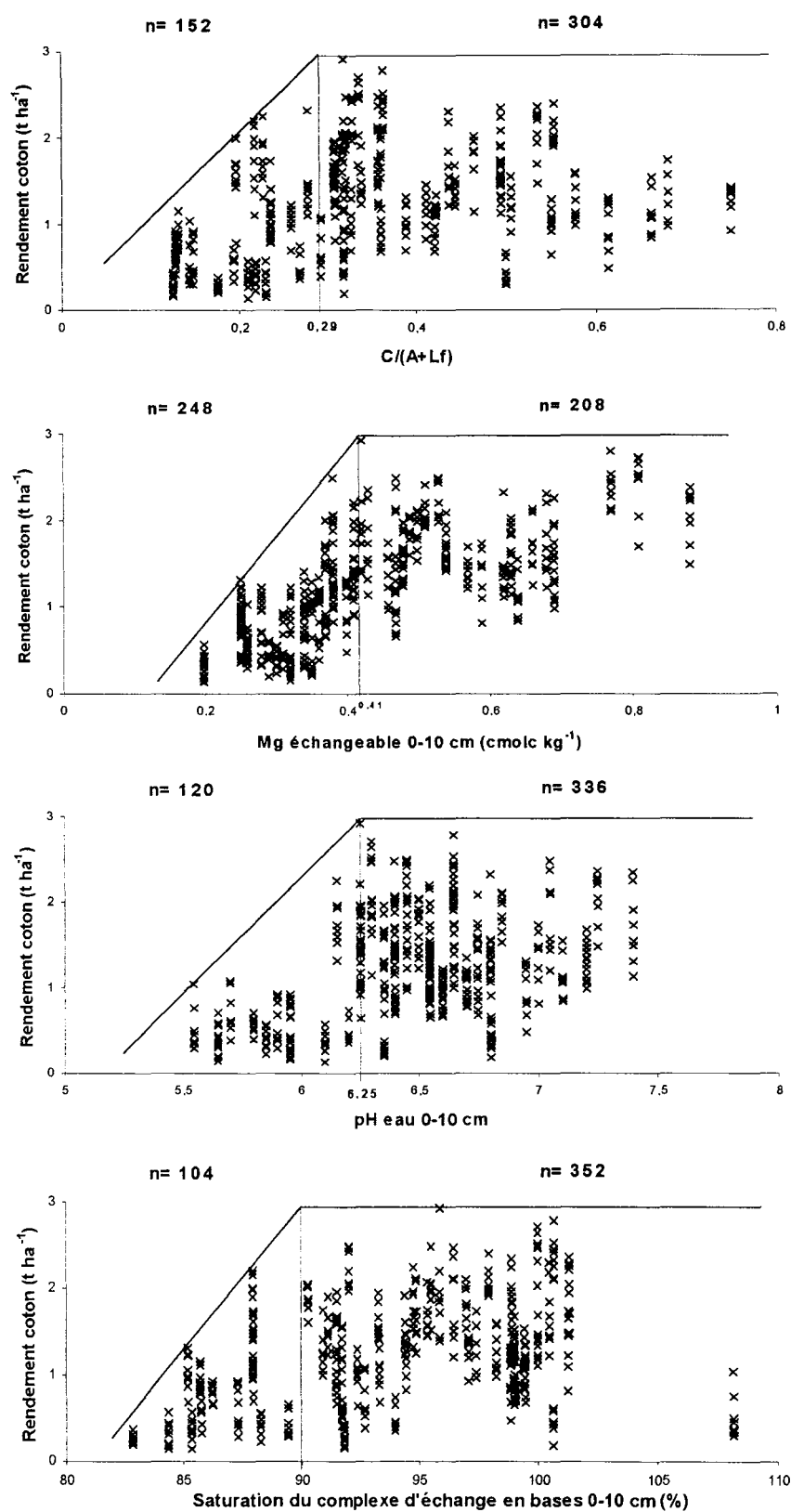


Figure 5 (suite).

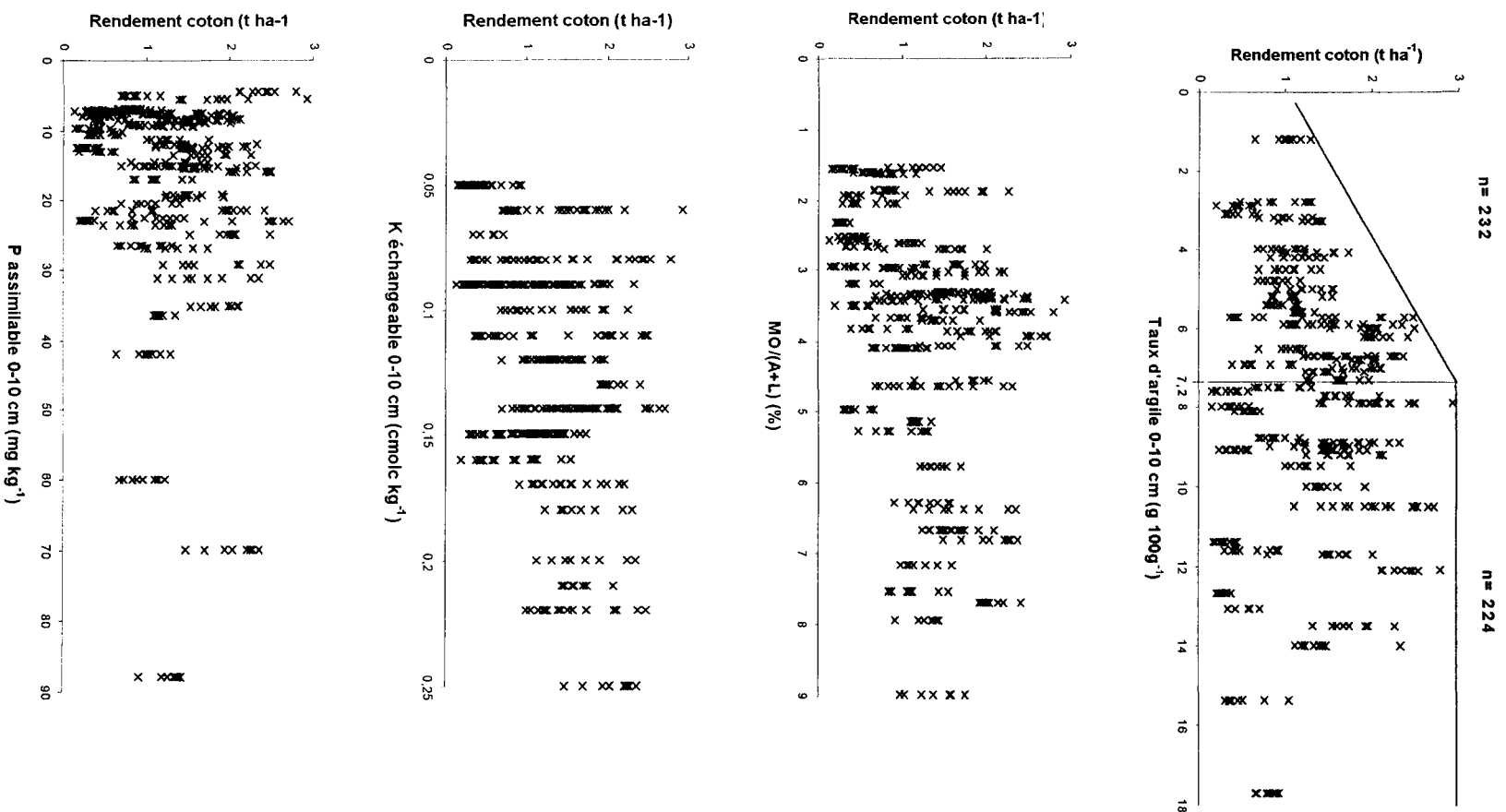


Figure 5 (fin).

1.3.4. Interprétation des relations entre rendement et variables sol par courbes enveloppes

Neuf variables sols du prélèvement 0-10 cm font apparaître par le tracé d'une courbe enveloppe (figure 5) une valeur seuil : teneurs en C et N totaux, CEC, teneurs en Ca et Mg échangeables, taux d'argile, pH, taux de saturation en bases du complexe d'échange et IF, indice de durabilité des systèmes de culture. Ces valeurs seuils sont déterminées graphiquement et le nombre de parcelles du diagnostic pour lesquelles la caractéristique de sol est inférieure au seuil est déterminé (figure 5).

Les autres variables ne font pas apparaître de valeur seuil, en particulier les teneurs en éléments nutritifs majeurs des plantes K échangeable et P assimilable, et l'indice IP (figure 5). Chaque valeur seuil ainsi définie partage l'ensemble des parcelles en deux groupes : les parcelles avec la caractéristique de sol en dessous du seuil et celles avec la caractéristique du sol au-dessus du seuil. Près de la moitié des parcelles ont une ou plusieurs caractéristiques en dessous d'un seuil. Afin de déterminer les corrélations existantes entre ces différents seuils, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur le positionnement des parcelles par rapport à chaque seuil, excepté vis à vis du seuil de l'indice IF qui est par définition corrélé aux seuils de

Tableau 4 : résultat de l'analyse en composantes principales du positionnement des parcelles par rapport aux seuils des caractéristiques physico-chimiques des sols, prélèvements de sol 0-10 cm (diagnostic agronomique, Tchad, 1994).

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Contribution des axes à la variation totale	55 %	18%	9%
Vecteurs propres des axes			
CEC	0,46	0,13	0,15
C total	0,44	-0,03	-0,12
Ca échangeable	0,46	0,07	0,15
Mg échangeable	0,44	0,05	0,15
N total	0,32	-0,01	-0,75
Argile	0,05	0,83	0,24
Saturation complexe	0,25	-0,24	-0,04
pH	0,17	-0,48	0,54

Tableau 5 : résultats de l'analyse de la variance du regroupement des essais "doses de sulfate de potassium" sur cotonniers (Tchad, 1994).

Facteurs	Test F	Moyenne du rendement en coton-graine (kg ha ⁻¹) par dose ¹
Dose	F = 5,6 ; p = 0,0009	D0 : 1088 B D1 : 1123 A D2 : 1142 A D3 : 1157 A
6 villages (157 essais)	Interaction lieu-dose F = 1,1 ; p = 0,11	
Dose	F = 1,8 ; p = 0,16	D0 : 589 D1 : 575 D2 : 633 D3 : 569
Village de Tchanar (30 essais)	Interaction lieu-dose F = 0,9 ; p = 0,76	

¹ Classement des moyennes par le test de Newman-Keuls. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas au seuil de probabilité de 0,05.

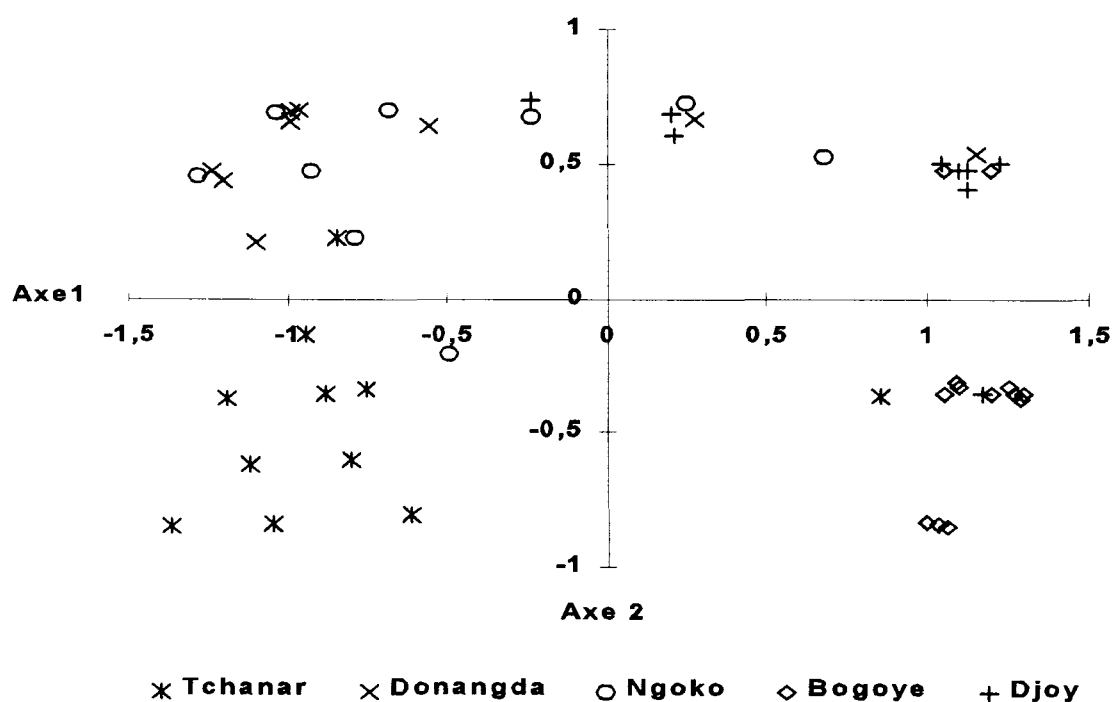


Figure 6 : représentation des parcelles des cinq villages dans le plan formé par les axes issus de l'analyse en composante principale sur le positionnement des parcelles par rapport aux seuils des principales caractéristiques physico-chimiques des sols. Axe 1 défini par les seuils CEC ; teneurs en C total, Ca et Mg échangeables ; axe 2 défini par le seuil taux d'argile.

teneur en C et taux d'argile. Chacune des huit caractéristiques définissant une valeur seuil prend la valeur 0 si la parcelle présente cette caractéristique au-dessous du seuil et 1 dans le cas contraire. Cette ACP sur données binaires centrées et réduites est équivalente à une analyse des correspondances (Bergonzini, 1986). Les résultats sont donnés dans le tableau 4. Deux axes résument 73% de la variabilité et définissent trois groupes de seuils : les seuils de CEC, teneurs en C total, Ca et Mg échangeables, fortement dépendants les uns des autres et formant le premier axe, le seuil du taux d'argile, indépendant des autres seuils et formant le second axe et les seuils en N total, pH et saturation du complexe participant à la formation des deux axes. La répartition des parcelles suivant les deux premiers axes permet de retrouver les parcelles du village de Tchanar, au-dessous à la fois du seuil argile et des seuils CEC et seuils corrélés et à l'opposé les parcelles de Djoy. Les parcelles des autres villages se positionnent dans les deux autres quadrants, celles de Bogoye étant plutôt au-dessus du seuil CEC et autres seuils corrélés et en moyenne au-dessous du seuil argile, tandis qu'à l'inverse, les villages de Ngoko et Donangda se situent en moyenne au-dessus du seuil argile et au-dessous du seuil CEC et seuils corrélés (figure 6).

1.3.5. Résultats de la réponse de la culture du cotonnier à l'apport de potassium

L'analyse de variance du regroupement des 157 essais (tableau 5) fait apparaître que la dose D1 (19,2 kg ha⁻¹ de K₂O) permet une augmentation de rendement significative de 35 kg ha⁻¹ de coton-graine par rapport au témoin. Les doses D2 et D3 ne sont pas significativement différentes de D1. L'interaction entre lieux et les doses d'apport d'engrais n'est pas significative. A Tchanar, le cotonnier ne répond pas aux apports d'engrais. Les parcelles de ce village ont pourtant une teneur en K échangeable en moyenne plus faible que celles des autres villages, mais une forte proportion de ces parcelles est en dessous des seuils de CEC et de taux d'argile définis précédemment.

1.4. Discussion

1.4.1. Remarque préliminaire

Le rendement moyen des parcelles faisant l'objet du diagnostic est supérieur au rendement moyen régional (759 kg ha^{-1}) de la même année. Les pratiques culturales se rapprochent plus des recommandations vulgarisées que celles observées pour d'autres suivis de parcelles conduits sans recommandation particulière (Raymond *et al.*, 1990).

1.4.2. Régressions linéaires du rendement en fonction des variables explicatives

L'ensemble des variables explique deux tiers de la variation du rendement en coton-graine observée, ce qui peut apparaître comme un bon résultat. Mais on ne peut attribuer de façon certaine que 15% environ des variations du rendement aux variables sols et un peu moins aux variables culturales. Le reste de l'explication des rendements ne peut être attribué de façon certaine à l'une ou l'autre des catégories de variables du fait que celles-ci sont fortement corrélées entre-elles. Il n'est donc pas possible de soustraire de la variabilité totale du rendement la part introduite par l'effet des pratiques culturales et d'analyser l'effet induit des seules variables sol.

Le problème engendré par l'existence de corrélations entre les différentes variables peut être illustré par le nombre de désherbages : celui-ci est en moyenne de 2,6 à Tchanar et Donangda, villages où les sols apparaissent moins fertiles et de 3,9 dans les autres villages. Si le sol est moins fertile, les adventices se développent moins vite et le nombre de sarclages nécessaire au maintien de la propreté de la parcelle est plus faible. La variable nombre de désherbages est donc corrélée aux variables sol. Son introduction dans une régression rendra compte à la fois de l'impact de cette technique culturale, mais aussi de celui de la capacité du sol à produire. Si on effectue une régression des rendements obtenus dans les six villages de l'étude et sur les 157 essais par les variables culturales, le coefficient de régression de la variable nombre de sarclages est de 240 kg ha^{-1} par sarclage (tableau 6). Il ne faut pas en conclure qu'un sarclage fait gagner autant en production. En effet, la même régression effectuée pour les villages de Tchanar et Donangda d'une part et pour les quatre autres villages d'autre part donnent respectivement des coefficients de régression de 98 et 56 kg ha^{-1} par sarclage (tableau 6). La moyenne pondérée de ces deux

Tableau 6 : résultats de la régression du rendement en coton-graine (kg ha^{-1}) et des variables culturales pour 157 essais (Tchad, 1994).

		Dose engrais ¹	Nombre de désherbages	Délais semis ²	Délais épandage engrais ²	Délais premier sarclage ³	Densité ⁴
Ensemble villages	Moyenne	100	3,3	10	13	17	53
	Coefficient de régression (écart-type)	0,6 (0,3)	240 (11)	-13 (2)	-1,6 (2)	15 (2)	9 (1)
Villages Tchanar et Donangda	Moyenne	100	2,6	13	6	11	53
	Coefficient de régression (écart-type)	0,1 (0,5)	98 (40)	-18 (3)	-24 (7)	20 (4)	13 (8)
Villages Bogoye, Djoy, Ngoko et Moyo	Moyenne	100	3,9	8	17	19	53
	Coefficient de régression (écart-type)	0,8 (0,3)	56 (22)	-19 (3)	-26 (3)	14 (3)	13 (9)

¹ kg ha^{-1} de sulfate de potassium, ² nombre de jours après le 30/05/98, ³ nombre de jours après semis, ⁴ $\times 1000 \text{ plants ha}^{-1}$.

valeurs est très inférieure au résultat obtenu pour l'ensemble des villages. En revanche, ce problème n'existe pas pour l'impact des doses d'engrais, le coefficient de régression de l'ensemble des villages (0,6 kg de coton-graine par kg d'engrais apporté) étant bien la moyenne pondérée de ceux des deux groupes de villages (0,1 et 0,8 kg de coton-graine par kg d'engrais apporté pour les deux villages de Tchanar et Donangda et les quatre autres villages respectivement). Cela résulte du fait que la dose d'engrais est totalement indépendante des variables sol, étant un facteur imposé expérimentalement.

Des corrélations existent entre variables de catégorie différente, mais également entre variables de même catégorie. Le cas des caractéristiques de sols est exemplaire. CEC et teneur en C du sol sont par exemple étroitement corrélés (figure 7). Les mêmes difficultés d'interprétation des régressions apparaîtront à l'intérieur de chaque catégorie de variable. L'explication du rendement par une variable explicative ainsi que la valeur du coefficient de régression vont

dépendre fortement des autres variables explicatives entrées dans le modèle.

Les corrélations entre variables sol, climat et pratiques culturales reflètent le fait que les agriculteurs adaptent leurs pratiques culturales aux conditions pédo-climatiques de leur parcelle. Les régressions montrent également que les caractéristiques physico-chimiques du prélèvement de sol 0-10 cm sont mieux corrélés au rendement que ceux du prélèvement 10-20 cm indiquant ainsi l'importance de l'horizon de surface d'un sol dans sa capacité à la production.

1.4.3. Seuils des caractéristiques physico-chimiques des sols

Le tracé de courbes enveloppe (figure 5) fait apparaître les groupes de caractéristiques de sol suivants :

1.4.3.1. Caractéristiques de sol sans valeur seuil

C'est le cas pour K échangeable, P assimilable, Mn échangeable et pour les différents rapports de teneurs en éléments du sol : Ca/Mg, Mg/K, (Ca+Mg)/K, N/P ainsi que le taux de saturation en Al échangeable.

Il est surprenant que la teneur en K échangeable des sols ne fasse pas apparaître de valeur seuil, malgré le déséquilibre des bilans minéraux des systèmes de culture au Tchad et les faibles valeurs observées (souvent inférieures à $0,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Ce résultat est en accord avec la faible réponse du cotonnier à la fertilisation potassique, pourtant obtenue dans de bonnes conditions climatiques et avec des techniques culturales optimales, mais en l'absence d'apports azotés, tant sous forme minérale qu'organique. En terme d'évolution, on peut admettre l'hypothèse que d'autres facteurs limitants apparaissent avant que ne s'exprime une déficience en K, comme par exemple une déficience en N, qui s'est manifestée sur certaines parcelles par des symptômes foliaires. Ceci est illustré par la réponse du cotonnier à la fumure potassique tout aussi faible à Tchanar que dans le reste de la région, malgré des sols pauvres en K échangeable. Or K échangeable est également en relation avec la CEC et N total avec des seuils de CEC et de N en dessous desquels le potassium échangeable est très faible (figure 7). Ces relations entre K échangeable et CEC et entre K échangeable et N sont analogues puisque CEC et C sont fortement corrélés, de même que C et N, ces corrélations pouvant être considérées cette fois-ci comme

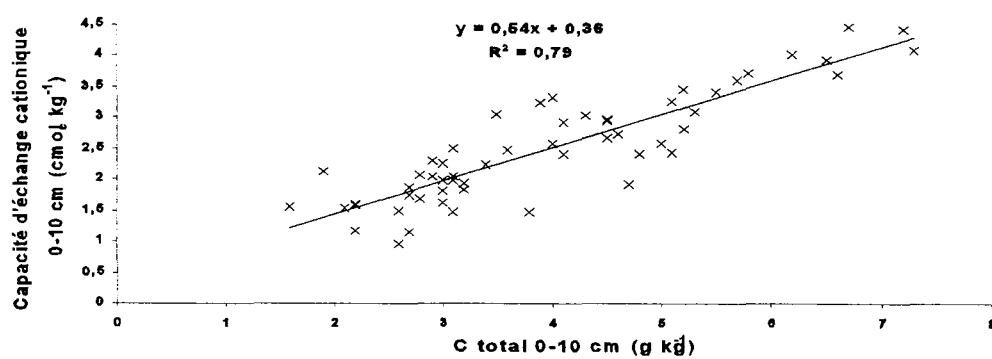
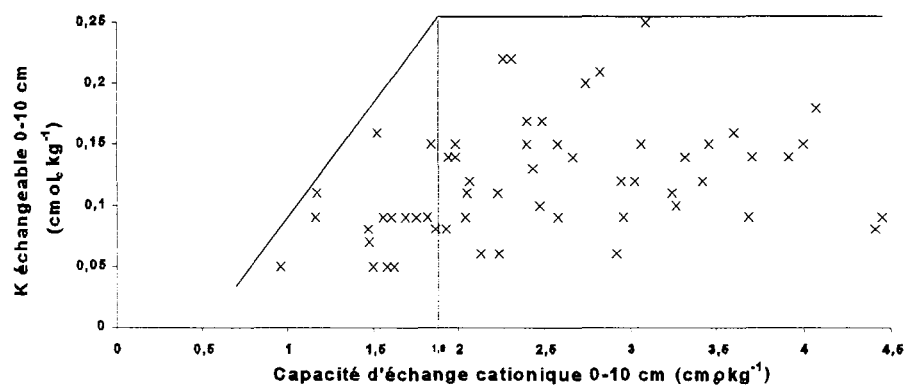
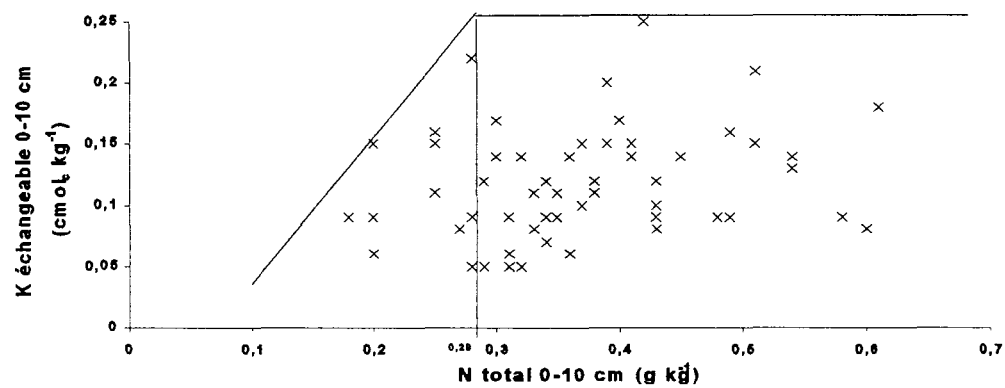


Figure 7 : relations entre K échangeable et capacité d'échange cationique, entre K échangeable et N total et entre capacité d'échange cationique et C total, (diagnostic agronomique, Tchad, 1994).

fonctionnelles. En effet, une partie de la CEC des sols tropicaux résulte des groupements acides

faibles de la MOS (Fallavier, 1995) et le rapport C/N est une caractéristique de la composition chimique de la MOS. De faibles valeurs de K échangeable correspondent à de faibles valeurs en N total ce qui permet d'émettre l'hypothèse que pour la grande majorité des parcelles, c'est la déficience en N qui se manifeste.

L'indice IP ne fait pas apparaître de valeur seuil. Il est inférieur pour la majorité des parcelles suivies au seuil de 5% défini par Pieri comme limite au-dessous de laquelle la structuration physique du sol n'est plus possible. Par contre l'indice IF fait apparaître une valeur seuil très proche de celle établie par l'auteur. Ces deux indices ne diffèrent que dans la prise en compte des limons fins pour IF en lieu et place des limons pour IP. A priori, ne prendre en compte que la présence de limons fins apparaît plus logique, étant donné que les limons grossiers n'interviennent pas dans la formation d'agréats avec la MOS. On retiendra donc qu'un indicateur de fertilité de sol pouvant refléter la capacité du sol à présenter une bonne structure fait apparaître une valeur seuil et qu'il dépend de la somme de la teneur en argile et limon fin du sol.

1.4.3.2. Groupe de caractéristiques pour lesquelles le classement des parcelles au dessus et en dessous des valeurs seuils est équivalent (définissant le premier axe de l'ACP)

Il s'agit des teneurs en C et N totaux, de la CEC et des teneurs en Ca et Mg échangeables. Une parcelle ayant l'une des caractéristiques en dessous du seuil aura donc une forte probabilité d'avoir les autres caractéristiques également en dessous du seuil. La valeur seuil de la CEC déterminée par les courbes enveloppes, $2,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, est faible par rapport aux références généralement admises, généralement de $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Sanchez, 1976). Les valeurs seuils de teneur en Ca et Mg échangeables, respectivement 1,7 et $0,41 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ sont par contre élevée pour Ca et très élevée pour Mg par rapport aux valeurs seuils admises par ailleurs (Sément, 1980).

De ces différents seuils, on peut émettre l'hypothèse que seuls la CEC et N peuvent être effectivement facteurs limitants du rendement, les seuils des autres variables n'étant en fait que la résultante de processus liés aux deux premiers. La déficience des cultures en N est régulièrement mise en évidence au Tchad par les essais soustractifs et les essais de fertilisation, qu'ils soient multilocaux ou conduits en station. Les faibles CEC des sols peuvent apparaître comme un facteur limitant, ce qui n'est pas le cas de Ca et de Mg échangeables. On peut rattacher ces observations à une évolution des sols caractérisée par une perte de la MOS qui provoque une

diminution de la CEC et de N, limitant la production (Siband, 1974 ; Singh et Goma, 1995). Cette diminution de la MOS sous culture a été constatée par de nombreux travaux conduits en station : à Bambey au Sénégal (Pieri, 1979), à Bébédjia au Tchad (Richard et Djoulet, 1985), à Saria au Burkina Faso (Pichot *et al.*, 1981), à Gagnoa en Côte d'Ivoire (Chabalier, 1986). Elle résulte sur ces sites de processus de minéralisation. Parallèlement à cette évolution, une lixiviation du Ca et Mg se produit, mais sans constituer un facteur limitant du rendement.

1.4.3.3. Le taux d'argile définissant le second axe de l'ACP

Les positionnements des parcelles par rapport au seuil argile et par rapport aux seuils définis précédemment sont indépendants. L'hypothèse de processus d'érosion intervenant indépendamment de la minéralisation de la MOS peut être retenue. Un entraînement d'argile par érosion devrait cependant être corrélé avec une perte de MOS. On peut cependant admettre que cette perte de MOS par érosion est moins importante que celle découlant de la minéralisation. Les facteurs influençant l'érosion (pente, position par rapport à la toposéquence) seraient indépendants de ceux influençant la minéralisation de la MOS (essentiellement l'ancienneté de culture). Associé à ces deux processus, l'indice IF fait également apparaître un seuil (0,29) proche de celui cité par Feller (0,32). Cet indice peut représenter une sensibilité à la déstructuration des sols. Ce processus de déstructuration des sols a également été observé sur station (Charreau et Nicou, 1971, Morel et Quantin, 1972).

1.4.3.4. Des caractéristiques de sols participant aux deux axes de l'ACP

Il s'agit du pH et du taux de saturation en bases du complexe d'échange. Les valeurs des seuils ne peuvent représenter un facteur limitant de la production du cotonnier : 6,25 pour le pH eau et 90% pour le taux de saturation. Il s'agit bien encore d'un processus, en l'occurrence une acidification des sols et lixiviation d'éléments minéraux intervenant en même temps que les deux autres processus. Les seuils déterminés pour ces caractéristiques ne sont que des indicateurs des deux précédents processus.

1.4.4. Conclusion

Le diagnostic sur parcelles de cotonnier permet d'émettre les hypothèses suivantes comme facteur d'évolution des sols sous les systèmes de culture pratiqués dans le bassin cotonnier du Tchad. Un premier processus est la diminution de la MOS consécutive à sa minéralisation entraînant une diminution de N et de la CEC du sol. Un second processus serait lié à l'érosion et entraînerait une diminution du taux d'argile du sol. Une augmentation de la sensibilité du sol à la déstructuration est une conséquence de ces évolutions. Ces processus affectent considérablement la capacité productive des sols puisque la moitié des parcelles présentent des caractéristiques de sols qui sont en dessous des valeurs seuils à partir desquels le rendement en coton-graine est affecté. Ceci est notamment le cas dans les villages où le terroir cultivé est saturé et sur lesquels des traces d'érosion sont perceptibles. On constate également une acidification des sols et une baisse en calcium et magnésium échangeables. Mais cette évolution ne semble pas devoir constituer un problème aussi important que les précédents dans l'immédiat. Ces hypothèses d'évolution de sols sont à confirmer par un suivi dans le temps des caractéristiques de sols et de sa capacité de production.

Chapitre 2

**Evolution du carbone
des sols tropicaux sous
culture : étude des
expérimentations
d'apports organiques à
long-terme**

Chapitre 2

Evolution du carbone des sols tropicaux sous culture : étude des expérimentations d'apports organiques à long-terme

2.1. Introduction

Le diagnostic de la productivité des sols réalisé dans le bassin cotonnier du Tchad présenté dans le chapitre précédent confirme que la MOS est un des indicateurs pertinents de la capacité du sol à produire. Les niveaux de C et N des sols étudiés varient dans des proportions de 1 à 3 entre les valeurs extrêmes et les coefficients de variation autour de la moyenne sont de l'ordre de 25%. Des variations de même amplitude sont observées par des enquêtes analogues en Afrique sub-saharienne (annexe II-1). La qualité d'indicateur est traduit par des corrélations positives entre rendement des cultures et niveau de MOS qui apparaissent fréquemment en zone tropicale semi-aride. Ces corrélations ne permettent cependant pas d'attribuer un rôle fonctionnel à la MOS dans la capacité des sols à produire. Elles ne permettent donc pas d'établir laquelle des fonctions de la MOS serait dans chaque cas à l'origine des corrélations observées. Il est souvent constaté dans ces diagnostics que la CEC des sols est corrélée aux niveaux de MOS et d'argile et que la MOS est une fonction inverse de la durée de mise en culture des parcelles.

Cette relation entre MOS et durée de culture mérite d'être confirmée et précisée grâce aux expérimentations de longue durée. Le premier objectif est de comparer les variations temporelles de teneur en MOS sous culture et de les confronter aux variations spatiales observées par les diagnostics précédents afin de vérifier l'hypothèse que les variations spatiales observées peuvent découler de différences dans les pratiques culturales réalisées, comme les relations entre niveaux de MOS et durée de mise en culture des parcelles permettent de le supposer. Dans certaines expérimentations qui permettent de modéliser la cinétique de la MOS, on pourra prolonger les comparaisons effectuées avec les mesures directes par des simulations. Un second objectif de l'étude de ces expérimentations consiste à déterminer la capacité de techniques culturales telles que les apports de matière organique (MO) à modifier l'évolution de la MOS sous culture en replaçant les différences de niveaux de MOS qu'elles sont susceptibles d'engendrer par rapport aux variations spatiales et temporelles constatées dans les diagnostics et sur les expérimentations

à long terme. Enfin, un dernier objectif consiste à mettre en relation sur ces expérimentations l'évolution du rendement des cultures et l'évolution de la MOS afin de mettre en évidence d'éventuelles relations fonctionnelles qui pourraient expliquer les effets de valeurs seuils de MOS constatées dans le diagnostic.

Les expérimentations sur lesquelles porteront cette étude ont été menées sur la station de Bébédjia au Tchad et sur la station de Gagnoa en Côte d'Ivoire. Sur chacune de ces expérimentations des parcelles recevant des apports annuels de MO ont été comparés à un témoin sans apport de MO. Les fertilisations minérales sont communes aux deux traitements et spécifiques dans chaque site. Cette disposition permet de définir les paramètres du modèle d'évolution de la MOS établi par Hénin et Dupuis (1945) qui a été appliqué sur ces expérimentations. Les avantages et inconvénients de ce modèle sont discutés.

2.2. Matériel et méthodes

2.2.1. Expérimentations étudiées

Les expérimentations sont localisées au Tchad et en Côte d'Ivoire.

2.2.1.1. Au Tchad, sur la station de Bébédjia (08° 41' de latitude nord ; 16° 34' de longitude ouest)

Deux essais comparent à des témoins sans apports de MO, des parcelles ayant reçu des apports de MO fraîche (non compostée) ou préhumifiée (terre de parc, compost ou fumier).

2.2.1.1.1. L'essai B1

L'essai B1 est implanté en 1993 sur sol beige classé comme ferrugineux tropical lessivé selon la classification française des sols (Aubert, 1968) ou Alfisol selon la classification américaine (Soil Survey Staff, 1990), développé sur alluvions du Continental Terminal. Le profil pédologique du sol est donné en annexe II-7. La pente est inférieure à 1%. L'essai a été installé après défriche d'une jachère arbustive et arborée de plus de dix ans. Aucune manifestation visuelle d'érosion correspondant à des départs de terre (rigoles, griffes d'érosion ou accumulation de terre en aval

paille dose 2	engrais minéral	témoin	engrais minéral	fumier dose 1	témoin	fumier dose 2	témoin	engrais minéral	témoin	paille dose 1	engrais minéral
------------------	--------------------	--------	--------------------	------------------	--------	------------------	--------	--------------------	--------	------------------	--------------------

Figure 8 : exemple de répétition de l'essai B1, Bébédjia, Tchad.

des parcelles) n'a été décelée durant les trois années de culture. Les caractéristiques physico-chimiques du sol figurent en annexe II-8.

L'objectif de l'essai est de comparer les effets sur le rendement des cultures et le sol d'apports de MO et d'apports d'engrais minéraux équivalents en N, avec des doses susceptibles de compenser les exportations en N des cultures. Compte tenu de l'hétérogénéité que pouvait présenter le terrain après défriche, il a été choisi un dispositif permettant une répétition des témoins.

Dans un dispositif en blocs à parcelles divisées (split-plot) avec huit répétitions sont comparés :

- en facteur principal, quatre traitements nature et doses de MO :

- fumier dose 1 : fumier contenant approximativement la moitié de la quantité de N apportée par l'engrais minéral,
- fumier dose 2 : fumier contenant approximativement la même quantité de N que l'engrais minéral,
- paille dose 1 : paille contenant approximativement la moitié de la dose de N apportée par l'engrais minéral,
- paille dose 2 : paille contenant approximativement la même quantité de N que l'engrais minéral

- en facteur secondaire l'existence et le type d'apports (apport de MO, apport d'engrais minéral et témoin absolu). Un exemple d'une répétition sur le terrain est donné en figure 8.

La surface d'une parcelle élémentaire est de 80 m² (8X10 m), celle de la parcelle utile est de 40 m² (4X10 m).

Les doses d'engrais minéral sont définies afin d'assurer l'équilibre du bilan azoté et réajustées en fonction des rendements moyens de l'année précédente. Les doses de MO sont calculées par rapport aux doses d'engrais minéral, et réajustées compte-tenu des épandages réalisés les années précédentes et des résultats d'analyse des MO. Ces différentes doses ainsi établies sont données dans le tableau 7.

Tableau 7 : doses d'engrais minéral et de matière organique sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad.

Années	Engrais minéral	Fumier dose 1	Fumier dose 2	Paille dose 1	Paille dose 2
1993	150 kg ha ⁻¹ de NPKSB (19-12-19-5-2) et 75 kg ha ⁻¹ d'urée	4 t MS ha ⁻¹	8 t MS ha ⁻¹	6 t ha ⁻¹	12 t MS ha ⁻¹
1994	200 kg ha ⁻¹ de NPKSB (19-12-19-5-2)	1,5 t MS .ha ⁻¹	3 t MS ha ⁻¹	2,5 t MS ha ⁻¹	5 t MS ha ⁻¹
1995	150 kg ha ⁻¹ de NPKSB (19-12-19-5-2) et 50 kg ha ⁻¹ d'urée	1,5 t MS ha ⁻¹	3 t MS ha ⁻¹	3,5 t MS ha ⁻¹	7 t MS ha ⁻¹

Elles correspondent, compte-tenu des teneurs en éléments minéraux des MO répertoriées en annexe II-11 aux apports de N, P et K mentionnés dans l'annexe II-2. Les apports de MO, paille ou fumier, correspondent bien respectivement pour les doses 1 et 2 à environ 50 et 100% du N apporté par la fumure minérales, mais apportent considérablement plus de P et K que la fumure minérale.

La rotation mise en place est coton/maïs. La pluviométrie des années correspondantes est donnée en annexes II-4 et II-5 et les opérations culturales réalisées en annexe II-9.

2.2.1.1.2. L'essai B4

L'essai B4 est implanté en 1991 sur le même type de sol que l'essai B1, après une jachère restée au stade herbacé. La pente est d'environ 1%, mais les cultures sont semées perpendiculairement au sens de la pente et les allées entre répétitions ne sont jamais travaillées. Comme pour l'essai B1, aucune manifestation visible d'érosion n'est à signaler sur l'essai durant les quatre années d'observation. Les caractéristiques initiales du sol (annexe II-8) sont moins favorables que sur l'essai B1. Le sol est plus sableux, plus acide, le taux de MOS et la capacité d'échange cationique sont plus faibles ainsi que les teneurs en bases échangeables. Cette différence d'état de fertilité initiale entre B1 et B4 est illustrée par la biomasse de la jachère, de faible

importance et herbacée sur B4, importante et ligneuse sur B1.

L'objectif de l'essai est identique à celui de B1. Il s'agit de comparer les effets sur le rendement des cultures et le sol de différents types de MO, apportés suivant différentes modalités.

Dans un dispositif en bloc à parcelles divisées (split-plot), trois facteurs hiérarchisés sont croisés. Le facteur principal est la cadence des apports de MO avec deux traitements, apports annuels et apports un an sur deux. Le facteur intermédiaire est le type de MO apporté avec huit traitements, paille de jachère enfouie, tige de maïs enfouie, mulch de maïs, tourteaux de coton enfouis, terre de parc enfouie, fumier d'étable enfoui, fumier de parc d'hivernage enfoui et compost enfoui. Le facteur en petites parcelles est la modalité d'apport avec trois traitements, témoin sans apport, apport de MO à 10 t ha⁻¹ de matière sèche et apport de MO à 10 t MS ha⁻¹ de matière sèche plus complément de 46 kg ha⁻¹ de N à la levée sous forme d'urée. La surface d'une parcelle élémentaire est de 64 m² (8X8 m), celle de la parcelle utile est de 32 m² (4X8 m). Trois répétitions sont mises en place. La rotation est coton/maïs. Les techniques culturales réalisées de 1991 à 1994 sont répertoriées en annexe II-10 et la pluviométrie des années correspondantes est donnée en annexes II-4 à II-6. Les types de MO correspondent à différents procédés de fabrication décrits en annexe II-11 qui indique également la teneur en éléments minéraux de ces amendements.

2.2.1.2. En Côte d'Ivoire, sur la station de Gagnoa (06° 08' de latitude nord ; 5° 56' de longitude ouest)

Le site, la localisation et le dispositif de l'essai ont été décrits par ailleurs (Pichot *et al.*, 1977 ; Chabalié, 1986 ; Gigou et Kouassi-Bredoumy, à paraître). L'essentiel est rappelé ci-après. La station de Gagnoa est située en zone forestière du centre-sud de la Côte d'Ivoire. La moyenne de pluviométrie annuelle est de 1500 mm avec une saison sèche et une saison des pluies à répartition bimodale des précipitations. La première saison pluvieuse s'étend de mars à juin et la seconde de septembre à décembre. Deux cultures annuelles de premier et second cycles sont possibles.

Les sols de la station sont classés comme ferrallitiques selon la classification française et appartiennent à la classe des Alfisols (Udalfs) selon la classification américaine. L'annexe II-8 résume les caractéristiques physico-chimiques initiales de l'essai. Les caractéristiques du sol sont

nettement meilleures que celles des essais de la station de Bébédjia : le taux d'argile est plus élevé, ainsi que le taux de MOS, la CEC et les teneurs en bases échangeables.

L'essai G a été mis en place en 1971, après défriche d'une plantation de caféiers. Dans un dispositif factoriel en bloc avec huit répétitions, il croise deux niveaux d'apport de compost, 0 et 10 t MS ha⁻¹ an⁻¹, à six niveaux d'apport de N minéral fractionné au semis et à 45 jours après le semis, de 0 à 200 kg ha⁻¹ de N à pas croissant de 40 kg ha⁻¹ sous forme d'urée. L'annexe II-12 regroupe les résultats des analyses des teneurs du compost en éléments minéraux.

La culture de premier cycle est systématiquement un maïs. La culture de second cycle est diverse : second maïs remplacé par la suite par du soja, de l'arachide ou du niébé. Une fertilisation P et K est apportée uniformément à raison de 150 et 200 kg ha⁻¹ an⁻¹ respectivement, ainsi que de la dolomie, à 150 ou 200 kg ha⁻¹ an⁻¹. L'essai est implanté sur un terrain avec une pente non négligeable (3%). Une érosion en nappe diffuse a été constatée lors des premières années de culture. Un aménagement anti-érosif a été mis en place par la suite.

2.2.2. Prélèvements de sol et analyses

L'intérêt de ces trois essais est qu'on dispose, au moins une fois, de prélèvements de sols et d'analyses parcellaires permettant une analyse statistique des résultats. Le tableau 8 résume la fréquence des prélèvements et analyses disponibles. Les prélèvements sont effectués sur les profondeurs 0-20 et 20-40 cm sur l'essai B1 et 0-20 cm sur les essais B4 et G. Pour les essais B1 et B4, les prélèvements ont lieu à la fin de la saison sèche aux mois d'avril/mai, avant la mise en place de la culture de l'année correspondante. Pour l'essai G, les prélèvements ont lieu au pendant la saison sèche au mois de janvier/février, avant la mise en place de la culture de premier cycle de l'année correspondante.

Les analyses ont été réalisées par les laboratoires du CIRAD à Montpellier. Les teneurs en C et N totaux sont déterminés par voie sèche sur analyseur automatique LECO CHN 600. La teneur en P assimilable est déterminée par la méthode Olsen modifié Dabin. Le complexe d'échange est analysé pour les prélèvements de sols postérieurs à 1983 en utilisant comme ion échangeur le chlorure de cobaltihexamine. Cette méthode permet la détermination de la capacité d'échange cationique au pH du sol (Fallavier *et al.*, 1985). Pour les prélèvements de sols antérieurs à 1980, le complexe d'échange est analysé en utilisant comme ion échangeur l'acétate

Tableau 8 : prélèvement et analyses disponibles sur les essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.

Essai	Année mise en place	Prélèvements et résultats d'analyses de sols disponibles						
		Etat initial	Prélèvement 1	Prélèvement 2	Prélèvement 3	Prélèvement 4	Prélèvement 6	Prélèvement 6
B1	1993	n.d.	1994 parcellaire*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B4	1991	par type de MO	1992 par type de MO	1995 parcellaire**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
G	1971	parcellaire, partiel***	1974 parcellaire, partiel***	1975	1979 parcellaire	1981	1982 par traitement (12)	1993

* analyses réalisées : C et N parcellaires, autres caractéristiques : parcellaires pour les traitements fumier et paille dose 2 uniquement. **analyses réalisées : parcellaires pour le traitement apport annuel uniquement. ***pour les traitements 0 et 10 t ha⁻¹ an⁻¹ de compost et 0 et 160 kg ha⁻¹ de N. n.d. : pas de données.

d'ammonium, à pH 7.

2.2.3. Analyses statistiques des résultats

Les rendements et résultats d'analyses de sols parcellaires permettent une analyse statistique des résultats.

Sur l'essai B1, la méthode des contrastes (Philippeau, 1985) permet d'effectuer des comparaisons entre les effets des apports de MO fraîche et de MO préhumifiée, et pour chaque nature de MO, de faire ressortir la comparaison entre les deux doses mises en place. Des combinaisons linéaires des moyennes par objet permettent d'estimer trois effets indépendamment les uns des autres en utilisant les coefficients figurant au tableau 9.

Pour profiter du contrôle d'hétérogénéité permis par les parcelles témoins proches de chaque parcelle recevant la MO, il est calculé des combinaisons linéaires non pas sur les moyennes brutes, mais sur les différences de moyennes par rapport au témoin. Cela revient à s'intéresser aux contrastes d'interaction avec les coefficients figurant au tableau 10.

Sur les essais B4 et G, l'analyse de variance classique est réalisée.

Tableau 9 : coefficients des contrastes sur les effets simples, essai B1, Bébédjia, Tchad.

	fumier		paille	
	dose 1	dose 2	dose 1	dose 2
contrastes 1 : comparaison entre pailles fumiers	1	1	-1	-1
contrastes 2 : comparaison entre doses de fumier	-1	+1	0	0
contrastes 3 : comparaison entre doses de paille	0	0	-1	+1

Tableau 10 : coefficients utilisés pour les contrastes de l'interaction sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad.

F1	F2	contraste 1 comparaison entre pailles fumiers	contraste 2 comparaison entre doses de fumier	contraste 3 comparaison entre doses de paille
fumier dose 1	matière organique	+1	-1	0
	engrais minéral	0	0	0
	témoin	-1	+1	0
fumier dose 2	matière organique	+1	+1	0
	engrais minéral	0	0	0
	témoin	-1	-1	0
paille dose 1	matière organique	-1	0	-1
	engrais minéral	0	0	0
	témoin	+1	0	+1
paille dose 2	matière organique	-1	0	+1
	engrais minéral	0	0	0
	témoin	+1	0	-1

2.2.4. Détermination des coefficients du modèle de Hénin-Dupuis

2.2.4.1. Intérêt du modèle

Depuis que la minéralisation de la MOS est considérée comme un processus majeur de l'évolution de la fertilité des sols sous culture, des modèles d'évolution de la MOS sont proposés. Après celui de Jenny (1944), Hénin et Dupuis (1945) proposent un modèle encore largement utilisé. Celui-ci, qualifié de mono-compartimental, considère que la MOS ne forme qu'un seul compartiment soumis à une évolution unique conditionnée par des entrées de biomasse et des sorties par des processus de minéralisation. Ce modèle a été partiellement validé en Europe (Boiffin et al., 1986 ; Balesdent, 1997). D'autres modèles à deux (Mary et Guérif, 1994 ; Plenet *et al.*, 1993), quatre (Van Der Linden *et al.*, 1987) et cinq compartiments (Pansu, 1991 ; Parton et Rasmussen, 1994 ; Jenkinson et Rayner, 1977) ont ensuite été proposés. Ces différents compartiments sont caractérisés par des vitesses de minéralisations spécifiques. Ces modèles prévoient de façon plus efficace l'évolution de la MOS constatée sur des essais de très longue durée que le modèle de Hénin-Dupuis. Cependant, les différents compartiments de MOS de ces modèles sont difficilement caractérisables, sauf celui de la biomasse microbienne. Il est donc difficile de paramétrer leur cinétique. La validation de ces modèles s'effectue principalement au travers de l'évolution de la MOS totale du sol résultant des cinétiques différenciées des compartiments de MOS.

L'intérêt du modèle de Hénin-Dupuis réside dans le faible nombre d'observations nécessaire à son paramétrage. Trois mesures de C ou N du sol d'une parcelle réalisées au cours de sa mise en culture à trois années différentes ou deux mesures réalisées à deux années différentes sur deux parcelles avec et sans apport de MO suffisent en théorie à son paramétrage. Même si le principe du modèle de considérer l'ensemble de la MOS comme évoluant de façon identique ne reflète pas la réalité, le modèle permet d'approcher des prévisions de stock de MOS avec un minimum d'observations.

2.2.4.2. Principes du calcul

La MOS (Y) augmente par l'introduction d'une partie de la biomasse (racines, biomasse aérienne retournant au sol, amendements organiques) et diminue du fait de sa minéralisation. Si M est la biomasse retournant au sol, la quantité entrant effectivement dans le compartiment de MOS est k_1M , avec k_1 , coefficient isohumique compris entre 0 et 1, caractéristique de la biomasse en question. La minéralisation de la MOS est égale à k_2Y , avec k_2 , coefficient de minéralisation de la MOS, compris entre 0 et 1, ne dépendant en principe que des conditions pédo-climatiques (figure 9).

Le même modèle s'applique au C et au N organique du sol ou encore à la MOS (soit $C_{sol} \times 1,72$) avec des coefficients spécifiques.

L'évolution de la MOS en fonction du temps est alors donné par l'équation (1) :

$$Y(t) = \frac{k_1 M}{k_2} - \left(\frac{k_1 M}{k_2} - A_0 \right) e^{-k_2 t} \quad (1)$$

où A_0 représente la quantité initiale de MOS. Si le sol reçoit tous les ans la même quantité et qualité de MO, le niveau de la MOS sera alors à l'équilibre donné par la formule :

$$Y_{\text{équilibre}} = \frac{k_1 M}{k_2}$$

Si $M = 0$ alors $Y_{\text{équilibre}} = 0$

La demi-vie de la MO, c'est à dire le temps nécessaire pour que la moitié de la MO devant se minéraliser le fasse effectivement, exprimé en années, est donné par la formule :

$$T_{\text{demi-vie}} = \frac{\ln 2}{k_2}$$

L'équation (1) comporte trois inconnues : A_0 , k_1M (ou k_1 si M est connu) et k_2 . Trois valeurs de Y à trois années différentes permettent de les déterminer. Si on dispose de deux parcelles avec et sans apports de MO et avec les hypothèses suivantes :

- les deux parcelles ont le même état initial A_0 ,

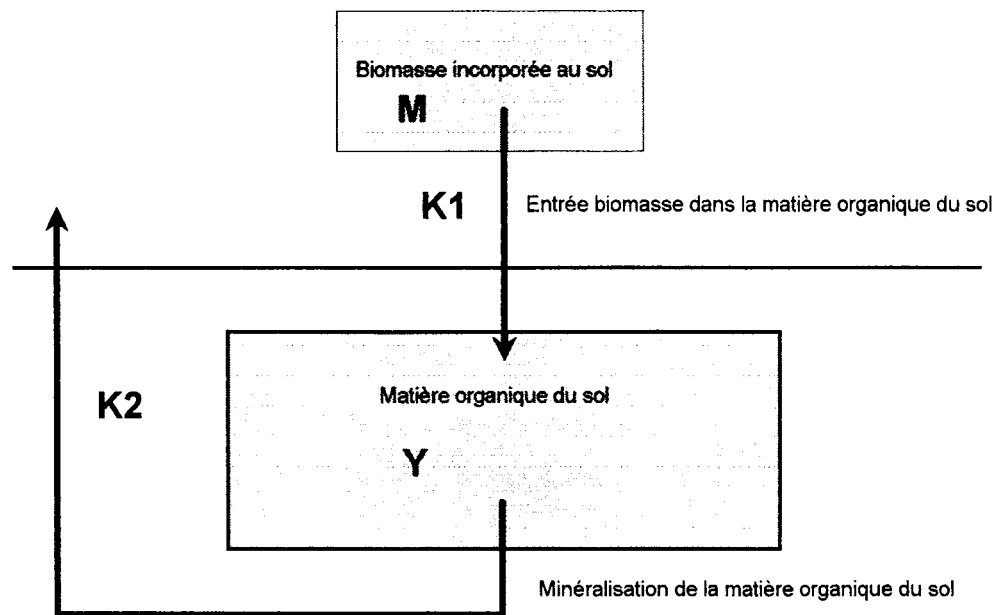


Figure 9 : schéma du fonctionnement du compartiment de matière organique du sol selon le modèle de Hénin-Dupuis.

- la différence d'entrée de MO entre les parcelles avec et sans apport de MO provient uniquement de l'apport de MO constitué d'une quantité annuelle constante M' ,

L'équation (1) donne alors :

$$Y_M(t) - Y_T(t) = \frac{k_1 M'}{k_2} (1 - \exp^{-k_2 t}) \quad (2)$$

avec $Y_M(t)$ et $Y_T(t)$ la quantité de MO respectivement de la parcelle avec apport et sans apport de MO, M' la quantité de MO apportée, k_1 le coefficient isohumique de la MO apportée et k_2 le coefficient de minéralisation de la MOS.

Les quantités de MO des sols peuvent être soit des teneurs en C ou N et il faut alors convertir M' en quantité de C ou N par kg de sol, soit des stocks de C ou N du sol et M' est alors une quantité de C ou N. Dans les deux cas il est nécessaire de connaître la densité apparente du sol.

L'équation (2) comporte deux inconnues, k_1 et k_2 . La connaissance de Y_M et Y_T à deux années différentes permet leur détermination.

2.2.4.3. Inconvénient du modèle

L'inconvénient du modèle de Hénin-Dupuis réside dans la difficulté de déterminer avec précision ses paramètres k_1 et k_2 . Ces derniers sont calculés d'après des équations exponentielles ce qui rend leur détermination extrêmement sensible à un faible écart des valeurs des données mesurées. Or la précision de la détermination de stock de C ou N d'un sol est généralement faible du fait des problèmes d'échantillonnage, de la précision des mesures de C et N et de la densité apparente du sol. D'autre part, les hypothèses préalables au calcul ne sont pas toujours vérifiées : état initial du stock de MOS identique pour les parcelles avec et sans apport de MO, constance des entrées annuelles de MO, ce qui signifie que les rendements doivent en principe être constants et identiques d'une année sur l'autre et pour les parcelles avec et sans apports de MO et que les quantités de C et N apportés par l'amendement organique doivent être constante d'une année sur l'autre. Les variations annuelles des teneurs en C et N des amendements organiques pourtant fabriqués de la même façon dont l'annexe II-11 et II-12 donne un aperçu et la difficulté de travailler avec des doses de matière sèche constante en ce qui concerne les apports de MO rendent peu aisée la réalisation de cette condition. Il faut également qu'aucune perte de MOS par érosion n'intervienne sur les parcelles pendant le temps d'observation. En ce qui concerne N, les sorties du système sol qui ne sont pas proportionnelles à la quantité de N organique du sol, telles que la lixiviation, ou les entrées dans le système qui ne sont pas constantes d'une année sur l'autre, telles des remontées de N par les mouvements de nappes, ne sont pas prises en compte par le modèle de Hénin-Dupuis.

De ce fait, l'imprécision sur la détermination des coefficients k_1 et k_2 est importante, et il arrive souvent qu'elle devienne impossible ou donne des résultats aberrants comme l'obtention de coefficients k_1 et k_2 non compris entre 0 et 1.

La détermination de ces coefficients ne sera possible qu'avec une grande précision dans les mesures des teneurs de C et N aux différentes dates de prélèvement. L'expérience montre que les résultats sont plus performants quand on effectue les calculs sur des regroupements parcelles, regroupement des répétitions d'un essai ou regroupement de traitements équivalents (regroupement par type de MO par exemple).

2.2.4.4. Données servant aux détermination pour les cas étudiés

La détermination des coefficients k_1 et k_2 du modèle de Hénin-Dupuis n'est possible que pour les essais B4 et G. Pour l'essai B4 les calculs sont réalisés pour les MO fraîches d'une part et pour les MO préhumifiées d'autre part.

Pour l'essai B4 et pour les apports de MO fraîches, les données proviennent des teneurs en C et N (i) du regroupement des parcelles avec apport de MO de trois types de MO fraîches : paille de jachère enfouie, tiges de maïs enfouie et tourteaux de coton enfouis et (ii) des parcelles sans apport de MO correspondantes, pour les années 1992 et 1995. Pour les MO préhumifiées, sont retenues, pour les mêmes années, les teneurs en C et N (i) du regroupement des parcelles avec apport de MO pour les quatre types de MO : fumier d'étable, fumier de parc d'hivernage, compost et terre de parc et (ii) des parcelles sans apport de MO correspondantes.

La densité apparente du sol a été mesurée en 1993. Il n'apparaît pas de différence entre les parcelles avec et sans apport de MO : la valeur est de 1,5. Les quantités de C et N apportées par les amendements organiques sont déterminées à partir des teneurs moyennes en C et N des différentes MO utilisées répertoriées en annexe II-12.

Pour l'essai G, les données servant de base aux déterminations des paramètres du modèle de Hénin-Dupuis sont les teneurs en C et N du regroupement des parcelles avec et sans compost, toute doses d'apport de N engrais confondues, pour les années 1982 et 1993. Il est préférable de ne pas retenir les premières années de l'essai en raison des problèmes d'érosion suspectés avant la mise en place de l'aménagement anti-érosif. La valeur de la densité apparente du sol est également de 1,5 (Chabaliér, 1986). Les quantités de C et N apportées par compost sont déterminées à partir des teneurs moyennes en C et N répertoriées en annexe II-12.

2.3. Résultats

2.3.1. Evolution des teneurs du sol en C et N

L'évolution des teneurs en C et N du sol a été observée sur 4 années pour l'essai B4 et sur 22 années sur l'essai G (tableau 11). Sur l'essai G, les teneurs en C et N ont diminué de près de la moitié en 22 ans. Sur l'essai B4, les évolutions constatées en quatre années sont de moindre

Tableau 11 : évolution des teneurs en C et N du sol, prélèvement 0-20 cm, sur l'essai B4, Bébédjia, Tchad et l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.

Essai	Année	Teneur en C (g kg ⁻¹)		Teneur en N (g kg ⁻¹)	
		Parcelles sans apport de matière organique	Parcelles avec apport de matière organique	Parcelles sans apport de matière organique	Parcelles avec apport de matière organique
B4 apport de matière organique fraîche*	1992	2,25	2,35	0,242	0,244
	1995	2,18	2,52	0,260	0,268
B4 apport de matière organique préhumifiée**	1992	2,29	2,36	0,252	0,265
	1995	2,42	2,67	0,253	0,300
G compost***	1971	10,67	10,95	1,084	1,061
	1974	9,09	10,73	0,907	1,046
	1982	7,23	8,80	0,935	1,058
	1993	6,07	8,62	0,656	0,819

* regroupement de trois matières organiques : paille de jachère, tige de maïs et tourteaux de coton enfouis en apport annuel. ** regroupement de quatre matières organiques : terre de parc, compost, fumier d'étable et fumier de parc d'hivernage enfouis en apport annuels. ***regroupement des six doses d'apport de N engrais.

amplitude et il est constaté plutôt une tendance à l'augmentation des teneurs.

L'effet des apports de MO sur les teneurs en C et N des sols est toujours positif. Cet effet n'est cependant pas en mesure de compenser la perte MOS constatée sur les témoins de l'essai G. Sur l'essai B4, l'effet des deux types de MO est d'importance voisine sur la teneur en C du sol, mais les teneurs en C des MO fraîches apportées sont plus importantes que celle des MO préhumifiées. Sur la teneur en N du sol par contre, les MO préhumifiées ont un effet sensiblement plus important que les MO fraîches dont l'effet est quasi-nul.

2.3.2. Calcul des paramètres du modèle de Hénin-Dupuis

Les paramètres du modèle de Hénin-Dupuis appliqué aux essais B4 et G sont déterminés d'après les données du tableau 11 et en utilisant l'équation 2. Sont calculés pour C et N, les coefficients isohumiques k_1 des MO appliquées, les coefficients de minéralisation k_2 de la MOS, l'état initial et les états d'équilibre pour les parcelles avec et sans apport de MO (tableau 12).

Les coefficients k_2 , de l'ordre de 0,08 à 0,09, sont identiques pour C et N et pour l'ensemble des essais. Les coefficients k_1 présentent des différences. Ils sont pour chaque essai plus élevés pour N que pour C. Ils sont de même ordre de grandeur pour le compost sur l'essai G et pour les MO préhumifiées sur l'essai B4. Par contre ils sont nettement inférieurs pour les MO fraîches. Les teneurs en C et N initiales et à l'équilibre sont assez proches sur l'essai B4 mais très différentes sur l'essai G. Les teneurs en C et N à l'équilibre sont toujours plus élevées pour les

Tableau 12 : paramètres du modèle de Hénin-Dupuis, essais B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.

	B4 matière organique fraîche	B4 matière organique préhumifiée	G
C	k_1	0,08	0,14
	k_2	0,09	0,08
	Etat initial (g kg ⁻¹)	2,28	2,24
	Etat d'équilibre sans apport de matière organique (g kg ⁻¹)	1,96	2,91
	Etat d'équilibre avec apport de matière organique (g kg ⁻¹)	3,05	3,84
N	k_1	0,10	0,31
	k_2	0,09	0,08
	Etat initial (g kg ⁻¹)	0,234	0,251
	Etat d'équilibre sans apport de matière organique (g kg ⁻¹)	0,321	0,257
	Etat d'équilibre avec apport de matière organique (g kg ⁻¹)	0,346	0,432

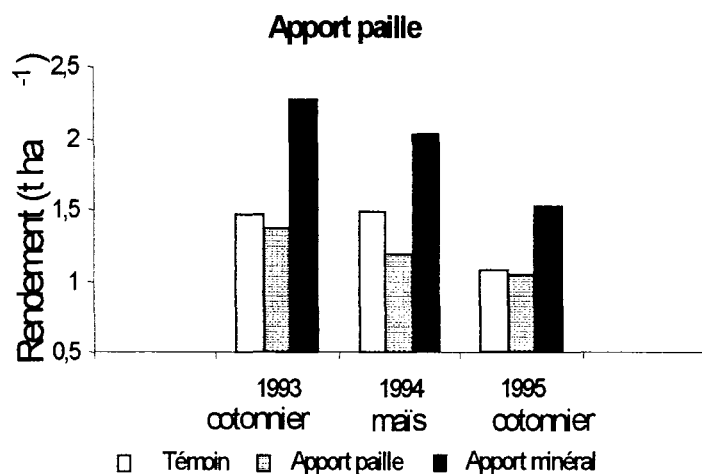
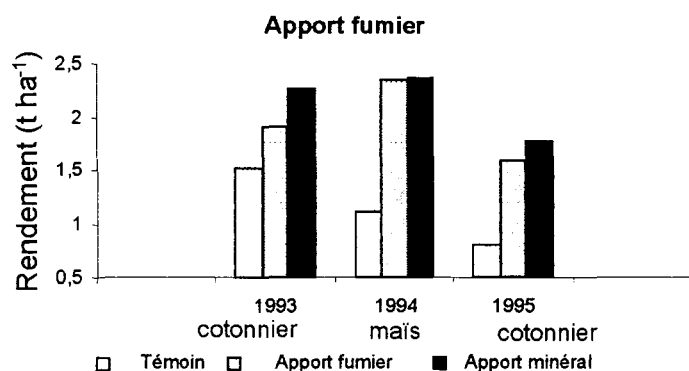


Figure 10 : effets d'apports de matières organiques et minéraux équivalents en N sur les rendements, essai B1, Bébédjia, Tchad

parcelles avec apport de MO, les différences étant plus importantes pour le compost et les MO préhumifiées que pour les MO fraîches. Toutefois, sur l'essai G, les teneurs en C et N des parcelles recevant le compost baissent de moitié entre l'état initial et l'état d'équilibre.

2.3.3. Evolution des rendements

Les analyses statistiques du rendement des cultures des essais B1 et B4 figurent en annexes II-13 à II-19. La figure 10 représente l'évolution du rendement de 1993 à 1995 sur l'essai B1 des

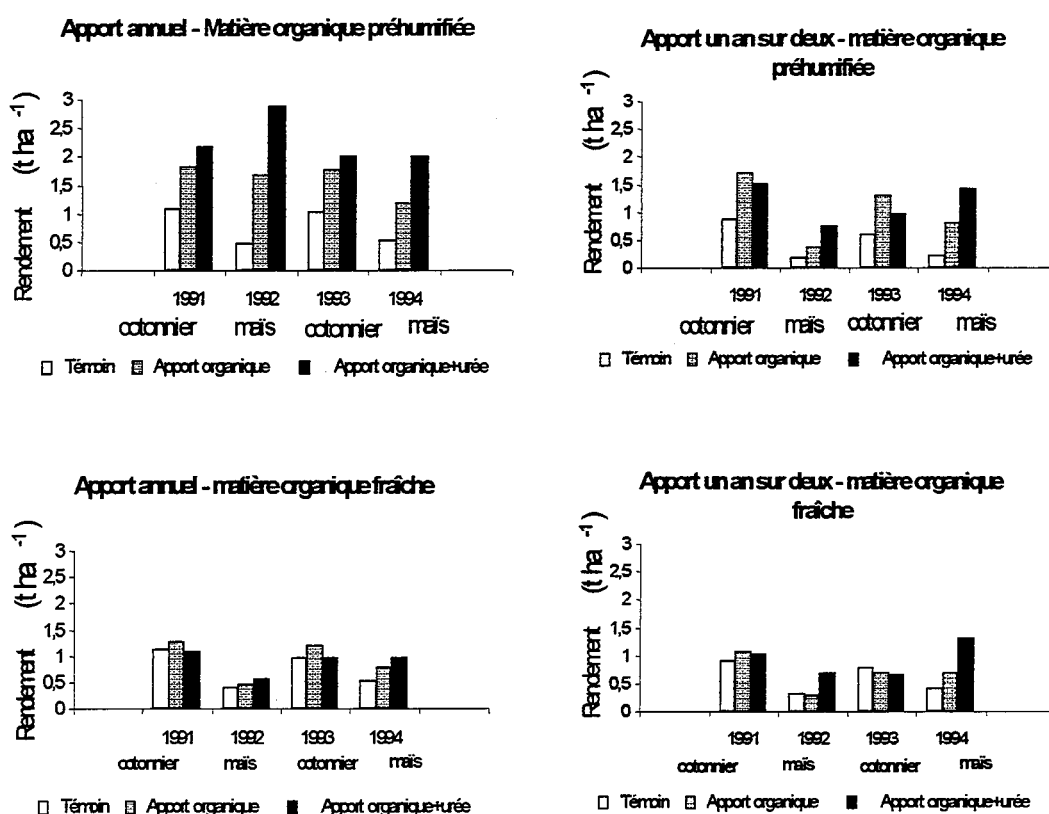


Figure 11 : effet des apports de matière organique et d'urée sur les rendements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

traitements témoin sans apport, apports de MO paille et fumier et apports minéraux. La figure 11 représente de 1991 à 1994 l'effet moyen sur l'essai B4 de trois types de MO fraîches, paille de jachère enfouie, tige de maïs enfouie et mulch de maïs et quatre types de MO préhumifiées, terre de parc, fumier d'étable, fumier de parc et compost avec et sans apport complémentaire d'urée et en apport annuel ou un an sur deux. La figure 12 représente à part l'effet sur le rendement des apports de tourteaux de coton. Ce type de MO est particulier car riche en N. Les résultats de l'effet du compost sans et avec apport de N engrais sur l'évolution des rendement du maïs de premier cycle de culture de 1971 à 1991 sur l'essai G sont représentés respectivement en figure 13 et 14.

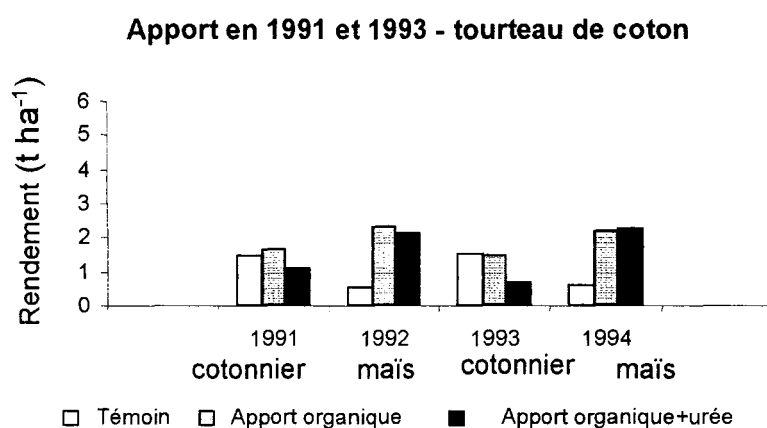
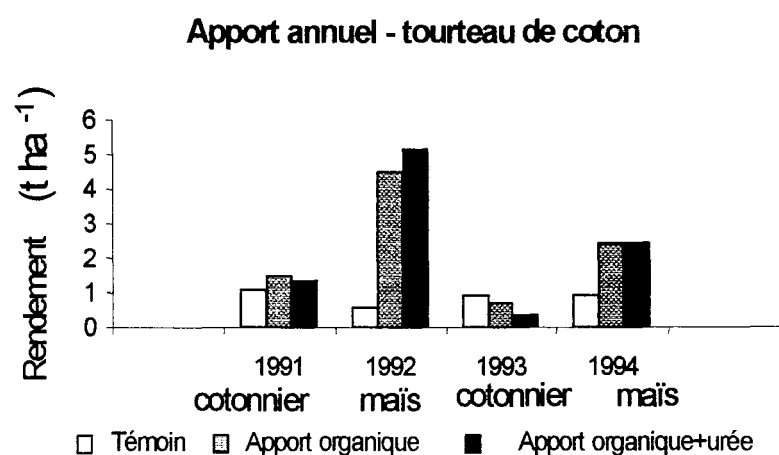


Figure 13 : effets d'apports de matières organiques et minéraux équivalents en N sur les rendements, essai B1, Bébédjia, Tchad

2.3.3.1. Effet des apports de matière organique préhumifiée

Les rendements des parcelles recevant des apports de MO préhumifiée sont sur tous les essais supérieurs aux témoins. L'effet est important dès la première année d'application sur les

essais B1 et B4. Sur l'essai G, avec apport complémentaire de N engrais, l'effet est faible et constant sur toute la période d'observation ; sans apport de N engrais, l'effet est peu important en première année, puis augmente jusqu'en 1975 pour rester constant par la suite. Sur l'essai B4, l'apport complémentaire de N engrais améliore l'effet du fumier. En apport un an sur deux, on peut constater que l'arrière effet du fumier est moindre que l'effet direct et que l'apport de N complémentaire accroît plus cet arrière effet que l'effet direct. Sur l'essai B1, le fumier a un effet inférieur ou égal aux apports d'engrais minéraux contenant la même quantité de N.

2.3.3.2. Effet des apports de matière organique fraîche

Les effets sur le rendement des apports de MO fraîche sont toujours très inférieurs à ceux des MO préhumifiées. On constate même des rendements inférieurs aux témoins les deux premières années d'application sur B1. Il semble cependant que la tendance s'inverse à partir de la troisième année d'application sur B1 et B4 et qu'une faible amélioration des rendements apparaissent, en particulier si des apports de N complémentaires sont effectués.

2.3.3.3. Effet des apports de tourteau de coton

Le tourteau de coton, généralement valorisé comme aliment des ruminants, est, pour des questions économiques, proposé au Tchad comme amendement azoté, recommandé à la dose de 600 kg ha^{-1} . Son introduction dans le dispositif de B4 avait pour objectif de mettre en évidence son effet sur le stock organique du sol. Son effet sur le rendement est le reflet de sa richesse en N : l'apport complémentaire de N engrais n'améliore pas l'effet de l'apport de tourteau de coton qui est nul sur cotonnier et divers sur maïs, l'arrière effet étant supérieur à l'effet direct. Des problèmes de toxicité dus à un apport excessif de N n'est pas à écarter sur culture de cotonnier.

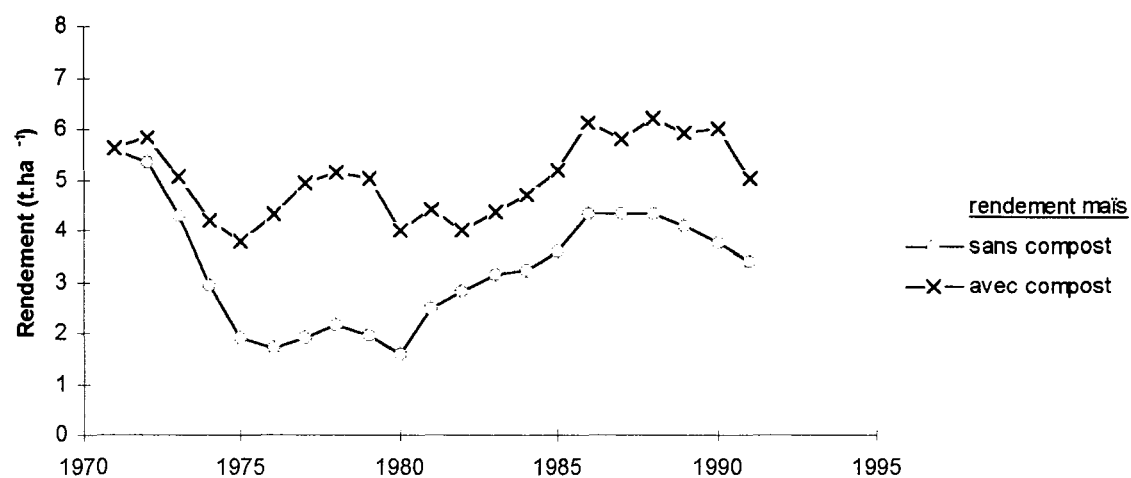


Figure 13 : effet du compost sur le rendement du maïs de premier cycle de culture en l'absence d'apport de N engrais, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.

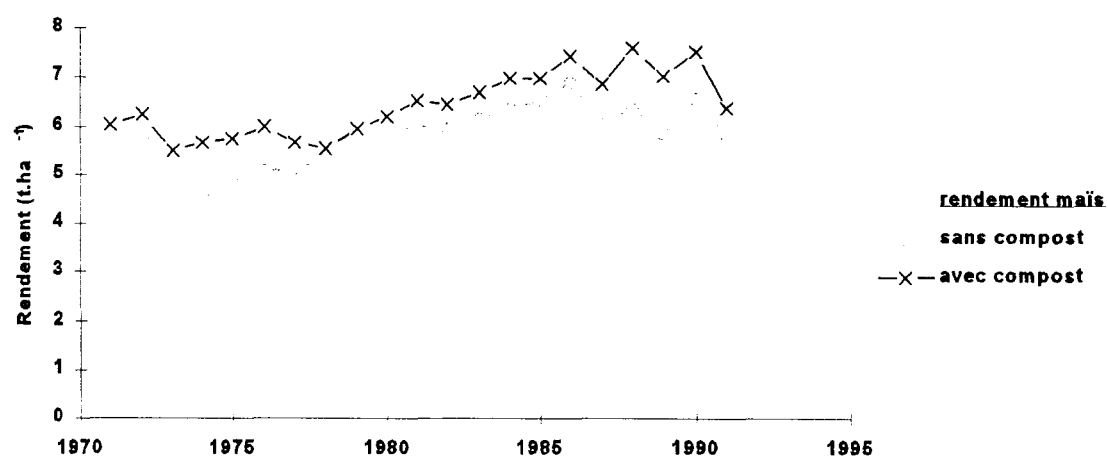


Figure 14 : effet du compost sur le rendement du maïs de premier cycle de culture avec 160 kg ha⁻¹ de N engrais, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.

2.4. Discussion

2.4.1. Evolution des teneurs en C et N du sol

L'amplitude des variations des teneurs en C et N du sol peut s'évaluer au travers de l'état initial et l'état d'équilibre prévus par le modèle de Hénin-Dupuis (tableau 12). Sur les essais B1 et B4, les variations entre les deux états vont de 1 à 1,7. Sur l'essai G, les variations sont plus importantes : des variations de 1 à 3 sont constatées entre les deux états. Ces variations sont donc de même amplitude que celles constatées dans les diagnostics régionaux (annexe II-1). L'hypothèse selon laquelle les variations spatiales de teneurs de MOS constatées dans les diagnostics sont le reflet d'une évolution temporelle est donc plausible. L'état d'équilibre sur l'essai G n'est pas atteint après 22 ans de mise en culture, ce qui confirme en milieu tropical les résultats de travaux en milieu tempéré sur l'importance du temps nécessaire pour atteindre ces états d'équilibre (Jenkinson et Rayner, 1977). Les deux essais G et B4 ont des paramètres d'évolution de la MOS identiques. C'est l'éloignement de l'état initial de l'état d'équilibre qui provoque sur l'essai G des variations importantes des teneurs de C et N au cours du temps et un état d'équilibre long à être atteint.

Les paramètres du modèle de Hénin-Dupuis calculés font état d'un coefficient de minéralisation de C et N identiques entre-eux et sur tous les essais. Ce résultat, en accord avec le fait que ce coefficient ne dépend en principe que des conditions pédo-climatiques, valide ici l'application du modèle : il est logique de trouver des coefficients de même grandeur au sein d'un même essai, et que les coefficients soient les mêmes pour C et N, puisque la minéralisation touche de la MOS. Ces coefficients sont également analogues sur l'essai du Tchad et celui de Côte d'Ivoire, indiquant des conditions de minéralisation analogues entre les deux sites.

Par contre, l'état initial prévu par le modèle de Hénin-Dupuis sur l'essai G est sensiblement supérieur à celui observé. Les phénomènes d'érosion observés à la mise en place de l'essai peuvent expliquer en partie cet écart. Mais on sait également qu'un modèle mono-compartmental n'est pas apte à simuler parfaitement l'évolution réelle de la MOS (Mary et Guérif, 1994).

Les valeurs de ces coefficients, de 8 à 9% sont plus élevées que celles déterminées sous climat tempéré, de l'ordre de 1 à 2% (Boiffin *et al.*, 1986 ; Plenet *et al.*, 1993). Ceci confirme la plus rapide minéralisation de la MOS sous climat tropical (Ayabana et Jenkinson, 1990). Pour

autant, l'état d'équilibre n'est pas systématiquement rapidement atteint en conditions tropicales comme le montre l'évolution de la MOS sur l'essai G. Même si les états d'équilibre ne sont pas aussi long à atteindre que sous climat tempéré (Jenkinson et Rayner, 1977), une vingtaine d'années peut ne pas être suffisante pour y parvenir. Peu de références permettent de comparer les valeurs calculées en milieu tropical. Les travaux de Gokhale (1959) et plus récemment de Laudelout *et al.* (1994) font état de valeurs identiques déterminée en conditions tropicales humides. Des valeurs sensiblement plus faibles, de 4 à 7%, sont proposées par Pieri (1989) ou Ganry (1990), mais selon des modalités de calcul différentes.

Les valeurs des coefficients isohumiques, de 14 à 18% pour le C des MO préhumifiées, sont plus faibles que les références établies en milieu tempéré qui sont de l'ordre de 30 à 40% (Boiffin *et al.*, 1986). Des valeurs plus faibles sont trouvées pour le C des MO fraîches. Sans être négatifs comme sur certaines expérimentations (Pieri, 1989), l'impact sur les teneurs en C du sol de ces MO fraîches, à C/N élevé, est moins important que celui des MO préhumifiées, à C/N bas. D'autres expérimentations (Traoré, 1974) en zone tropicale humide ont démontré l'impact positif de MO fraîche sur les teneurs en C du sol.

Les coefficients isohumiques appliqués à N sont plus élevés que celui du C. Cela peut provenir de la réorganisation de N engrais, processus pouvant être intensifié avec l'apport de MO (Ganry, 1990). Le coefficient isohumique des MO préhumifiées est pour N également supérieur à celui de MO fraîches, confirmant la supériorité des effets sur la MOS des apports de MO à C/N bas (Pieri, 1989).

2.4.2. Relations entre évolutions de la matière organique du sol et des rendements

De façon générale, on constate à la fois un effet positif des apports de MO sur le rendement et sur la teneur en C du sol. L'hypothèse selon laquelle l'effet sur le rendement de ces apports de MO est directement lié à la fonction de fourniture de N aux cultures est accréditée par différentes observations.

Les parcelles témoin de l'essai B1 et B4 ont une teneur à l'équilibre en N du sol inférieure au seuil de 0,3 g kg⁻¹ déterminé dans le diagnostic agronomique (voir chapitre 1). Les rendements de ces parcelles sur l'essai B1 s'effondrent rapidement et sur l'essai B4 sont très faibles, souvent inférieurs à 500 kg ha⁻¹

L'effet positif des apports de MO sur le rendement se constate dès la première année d'application sur les essais B1 et B4. L'importance de cet effet immédiat est à mettre en relation avec la minéralisation accrue de la MOS sur les parcelles recevant des apports de MO, processus qui intervient également dès la première année d'application des apports de MO. Sur l'ensemble des essais, on ne constate pas d'effets cumulatifs sur le rendement des apports de MO, ce qui traduit un effet direct lié à une minéralisation plus qu'un effet cumulatif provenant de l'augmentation de la MOS.

Sur l'essai B1, l'effet des apports de MO est toujours inférieur ou égal à celui de l'apport de N engrais en quantité équivalente. Sur l'essai B4, l'effet sur le rendement des différents types de MO est lié à leur teneur en N, et non à leur teneur en C (tableau 13). Dans la majorité des cas, l'effet de N engrais supplémentaire améliore l'effet des apports de MO, sauf pour le tourteau de coton, particulièrement riche en N (tableau 13). Sur ces deux essais dont le sol présente une fertilité initiale faible, les effets des apports de N engrais et des apports de MO s'additionnent.

Sur l'essai G, les effets des doses croissantes de N engrais et de compost font apparaître une interaction négative alors qu'aucune interaction négative des effets des traitements n'apparaît sur les principales caractéristiques de sol. L'effet des apports de compost est donc de même nature sur le rendement que l'apport de N engrais, alors que ces deux types d'apports ont des effets opposés sur les caractéristiques chimiques du sol (tableau 14). De telles interactions négatives entre fumure minérale et organique ont déjà été par ailleurs constatées (Richard, 1967). Du fait de la bonne fertilité initiale du sol, seul l'effet N s'exprime sur cet essai au niveau des rendements.

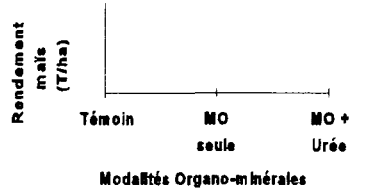
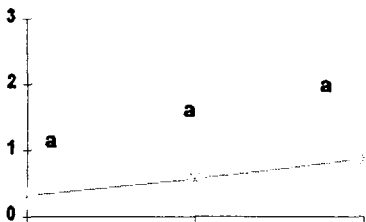
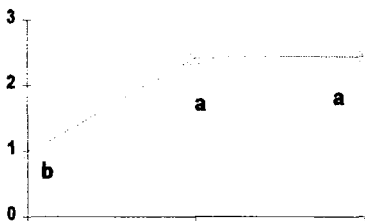
2.4.3. Conclusion

Les résultats des expérimentations étudiées et l'application du modèle de Hénin-Dupuis confirment que les évolutions de la MOS constatées sous culture sont de même amplitude que les variations de teneurs en MOS observées au cours de diagnostics régionaux. Les seuils de teneur en MOS sont confirmés, notamment celui de teneur en N de $0,3 \text{ g kg}^{-1}$ en dessous duquel les systèmes de culture pratiqués ne sont plus viables. Les amendements organiques préhumifiés sont aptes à maintenir le niveau de N du sol au dessus de ce seuil. Les apports de MO fraîche le sont beaucoup moins. L'apport de N engrais peut dans de nombreuses situations, notamment à des niveaux de teneur en N du sol proches du seuil, compléter efficacement les effets des apports de

Tableau 13 : effet sur le rendement de la culture de maïs, année 1994, d'apport de matière organique de différentes compositions minérales, essai B4, Bébédjia, Tchad.

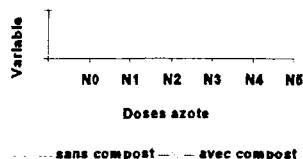
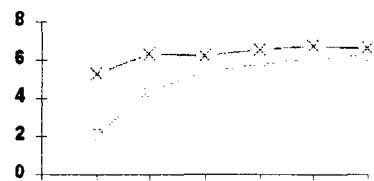
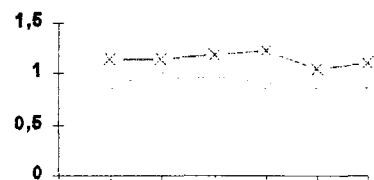
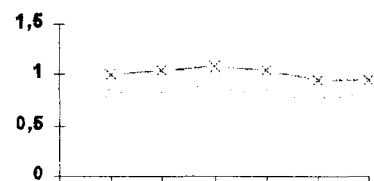
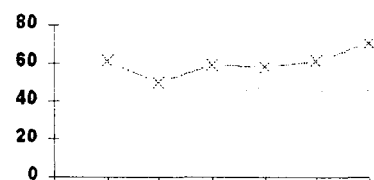
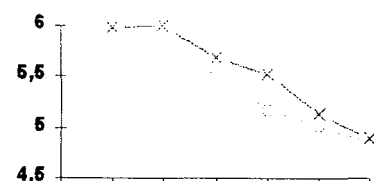
Matière orga- nique	Composition minérale (g MS kg ⁻¹)						Effets sur le rendement (les moyennes suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents par le test de Newman-Keuls à p<0,05)	
	C	N	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅		
Terre de parc	120	8	7	4	11	6		
Com- post	90	8	9	4	8	7		
Fumier d'étable	210	14	14	7	18	10		
Fumier de parc	20	21	15	11	26	15		

Tableau 13 (suite).

Matière orga- nique	Composition minérale (g MS kg ⁻¹)						Effet sur le rendement (les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différents par le test de Newman-Keuls à p<0,05)	
	C	N	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅		
								
Paille de jachère	410	7	7	2	8	3		
Tour- teaux de coton	-	70	-	-	20	20		

MO. L'effet positif sur le rendement des apports de MO préhumifiée se manifestera toujours, même sur des parcelles très fertiles, ce qui permet d'envisager leur vulgarisation avant qu'un niveau de dégradation du sol trop important ne soit atteint. Le modèle de Hénin-Dupuis permet dans une certaine mesure d'établir des prévisions d'évolution de la MOS. Les difficultés rencontrées pour son paramétrage et les écarts constatés entre observations et prévisions militent pour l'établissement de modèles prenant en compte les différents compartiments fonctionnels de la MOS.

Tableau 14 : effets des apports de compost et de N engrais sur le rendement année 1981 et les caractéristiques chimiques du sol, prélèvement 0-20 cm et analyses de 1981, essai G, Gagnoa.

Variable	Effet* compost	Effet* N	Interaction**	
Rendement maïs (t ha ⁻¹)	positif	positif	négative	
C sol (g kg ⁻¹)	positif	indé-terminé	aucune	
N sol (g kg ⁻¹)	positif	indé-terminé	aucune	
P assimilable (mg kg ⁻¹)	positif	positif	aucune	
pH eau	positif	négatif	aucune	

*Aucun effet : effet non significatif à $p < 0,05$; effet positif ou négatif : effet significatif à $p < 0,05$ avec classement des traitements par le test de Newman-Keuls dans l'ordre respectivement croissant ou décroissant des doses appliquées ; effet indéterminé : effet significatif à $p < 0,05$ avec un classement des traitements par le test de Newman-Keuls qui n'est ni dans l'ordre croissant ni dans l'ordre décroissant des doses appliquées
 **Aucune : effet de l'interaction non significatif à $p < 0,05$; effet positif ou négatif : effet significatif à $p < 0,05$ avec classement des traitements par le test de Newman-Keuls faisant apparaître un effet de l'interaction respectivement plus ou moins qu'additif des effets simples ; effet indéterminé : effet significatif à $p < 0,05$ avec un classement des traitements par le test de Newman-Keuls ne permettant pas de conclure à un effet plus ou moins qu'additif des effets simples

Tableau 14 (suite)

Variable	Effet* compost	Effet* N	Interaction**	
Ca échangeable (Cmol _c kg ⁻¹)	positif	négatif	aucune	
Mg échangeable (Cmol _c kg ⁻¹)	positif	négatif	indé- terminée	
K échangeable (Cmol _c kg ⁻¹)	positif	négatif	aucune	
Bases échangeables (Ca + Mg + K) (Cmol _c kg ⁻¹)	positif	négatif	aucune	
CEC (Cmol _c kg ⁻¹)	positif	aucun	aucune	

*Aucun effet : effet non significatif à $p < 0,05$; effet positif ou négatif : effet significatif à $p < 0,05$ avec classement des traitements par le test de Newman-Keuls dans l'ordre respectivement croissant ou décroissant des doses appliquées ; effet indéterminé : effet significatif à $p < 0,05$ avec un classement des traitements par le test de Newman-Keuls qui n'est ni dans l'ordre croissant ni dans l'ordre décroissant des doses appliquées

**Aucune : effet de l'interaction non significatif à $p < 0,05$; effet positif ou négatif : effet significatif à $p < 0,05$ avec classement des traitements par le test de Newman-Keuls faisant apparaître un effet de l'interaction respectivement plus ou moins qu'additif des effets simples ; effet indéterminé : effet significatif à $p < 0,05$ avec un classement des traitements par le test de Newman-Keuls ne permettant pas de conclure à un effet plus ou moins qu'additif des effets simples

Chapitre 3
Utilisation des
fractions
granulométriques pour
la prévision de
l'évolution du stock
organique des sols
tropicaux sous culture

Chapitre 3

Utilisation des fractions granulométriques pour la prévision de l'évolution du stock organique des sols tropicaux sous culture

3.1. Introduction

De nombreuses études montrent que la culture continue sous climat tropical après jachère provoque une minéralisation importante de la MOS. En proportion du stock de matière organique (MO) en début de culture, la perte atteint 28% à Bambey, Sénégal, en quatre ans de culture d'une rotation mil/arachide sans fertilisation (Pieri, 1979) ; 25% à Bébédjia, Tchad, en 11 ans de monoculture de cotonnier sous diverses fertilisations minérales (Richard et Djoulet, 1985) ; 14% à Saria, Burkina Faso, en neuf ans de monoculture de sorgho sans fertilisation (Pichot *et al.*, 1981) ; environ 15% à Gagnoa, Côte d'Ivoire, en 10 ans de culture avec fertilisation comprenant deux cycles de culture : maïs en premier suivi d'un second maïs ou d'un soja (Chabalier, 1986). Cette évolution est susceptible d'entraîner une baisse de fertilité des sols compte-tenu de la faiblesse générale du stock de MO des sols ferrugineux et ferrallitiques tropicaux et de son rôle dans de nombreuses propriétés du sol. Ainsi, parallèlement à cette baisse, ont été constatées au Sénégal une chute de la porosité du sol, une augmentation de sa cohésion et une réduction de sa stabilité structurale (Charreau et Nicou, 1971). La sensibilité à l'érosion des sols est fonction, selon les équations de Wischmeier, de plusieurs paramètres dont l'un est la teneur en MO et cette relation a pu être vérifiée au Brésil (Leprun, 1988). L'évolution des sols mis en culture est également marquée par une baisse du pH et de la teneur en bases échangeables du sol (Kang, 1993 ; Singh et Goma, 1995). Les propriétés d'échange des sols tropicaux à argile de type kaolinite dominante sont dues en grande partie à la MO (Fallavier, 1995). La capacité d'échange cationique des sols diminue en même temps que C du sol (Feller, 1995a).

La préoccupation de maintien du potentiel de production des sols tropicaux en milieu semi-aride nécessite de proposer des systèmes de culture évitant que certaines caractéristiques du sol ne descendent au-dessous d'un seuil critique. C'est ainsi qu'il est proposé en ce qui concerne le taux de C du sol des valeurs critiques en fonction de la granulométrie en dessous desquelles des

phénomènes de dégradation physique des sols vont se manifester (Pieri, 1989) ou en dessous lesquelles la durabilité du système ne peut plus être assurée (Feller, 1995b).

L'inquiétude provoquée par des observations identiques en Europe a généré très tôt la conception de modèle d'évolution de la MOS permettant de déterminer l'aptitude des systèmes de culture à préserver un niveau approprié de celle-ci. Dès 1945, Hénin et Dupuis proposent un modèle qui a pu être partiellement validé sous climat tempéré (Boiffin *et al.*, 1986 ; Balesdent, 1997). Ce modèle, dit monocompartimental, considère que l'ensemble de la MOS est soumis à une évolution identique. D'autres modèles à deux (Mary et Guérif, 1994 ; Plenet *et al.*, 1993), quatre (Van Der Linden *et al.*, 1987) et cinq compartiments (Pansu, 1991 ; Parton et Rasmussen, 1994 ; Jenkinson et Rayner, 1977) ont ensuite été proposés. Les compartiments de MOS se différencient par leur vitesse de minéralisation. Ces modèles prédisent mieux que le modèle de Hénin-Dupuis les observations faites sur l'évolution du stock de MOS au sein d'essais à long terme. Cependant, excepté le compartiment biomasse microbienne pris en compte dans les différents modèles, les autres compartiments ne sont que conceptuels.

En milieu tropical, peu de confrontations de données à l'un ou l'autre des modèles présentés ci-dessus ont été réalisées. Des coefficients de pertes annuelles de C ont été calculés (Pieri, 1995) ou des coefficients de minéralisation du modèle de Hénin ont été déterminés sur certains essais où les équilibres en C ou N ont été considérés comme atteints (Ganry, 1991). Les coefficients obtenus font état d'une minéralisation plus rapide de la MOS qu'en milieu tempéré, ce qui confirme les résultats des études d'Ayanaba et Jenkinson (1990) et de Tiessen et Shang (1998).

Face à la multiplicité des composants de la MOS, la préoccupation d'isoler des fractions homogènes au point de vue de leurs propriétés a donné naissance à de nombreux travaux. Les méthodes de fractionnement chimiques n'ont pas encore permis d'isoler des compartiments de MOS ayant une cinétique de minéralisation individualisée. La nature chimique des composants de la MOS et leur dynamique semblent ne pas être corrélés (Balesdent, 1996 et 1997). Cependant, la méthode de fractionnement granulométrique qui sépare les constituants de la MOS en fonction de leur taille permet d'obtenir des fractions ayant des propriétés spécifiques (Feller et Beare, 1997). Les fractions se différencient par leur nature : débris végétaux et fongiques figurés pour les fractions de la taille des sables ; MO amorphes, parois végétales, mycéliennes ou bactériennes plus ou moins décomposées pour les fractions fines. Elles

se caractérisent aussi par un rapport C/N décroissant avec leur taille. Le rapport xylose/mannose est décroissant avec la taille des fractions (le xylose est le sucre neutre dominant dans les feuilles et les racines, et la proportion de mannose est plus importante dans les exsudats racinaires).

Cette méthode de fractionnement serait à même d'isoler des fractions de MOS ayant une origine et un temps de résidence différents. L'étude propose de déterminer l'impact d'apport organique, fumier ou compost, sur le contenu en MO des différentes fractions d'un sol, puis de déterminer leur vitesse de minéralisation. Cette estimation doit permettre d'approcher une modélisation de l'évolution de la MOS sous culture et de la comparer au modèle de Hénin-Dupuis.

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Dispositifs servant de support aux fractionnements

Le choix des dispositifs sur lesquels des prélèvements de sols ont été fractionnés a été conditionné par la disposition de plusieurs éléments : avoir une gamme la plus large possible de nombre d'années d'application des apports organiques pour l'étude des cinétiques d'évolution de la MOS, pouvoir réaliser des analyses statistiques sur les effets des apports organiques sur les caractéristiques de sols et disposer d'échantillons de sol à fractionner, ayant reçu (M) et n'ayant pas reçu (0) de MO.

Tableau 15 : provenance des échantillons de sols fractionnés.

Sols frac- tionnés	Essai	Traitement	Ancienneté des apports* (années)
B1 - 0 B1 - M	Bébédjia, Tchad, essai B1	0 t ha ⁻¹ an ⁻¹ fumier - 8 t MS ha ⁻¹ an ⁻¹	1
B4 - 0 B4 - M	Bébédjia, Tchad, essai B4	0 t ha ⁻¹ an ⁻¹ fumier - 10 t MS ha ⁻¹ an ⁻¹	4
G11 - 0 G11 - M	Gagnoa, Côte d'Ivoire, essai G	0 t ha ⁻¹ an ⁻¹ compost - 10 t MS ha ⁻¹ an ⁻¹	11
G22 - T G22 - M		0 t ha ⁻¹ an ⁻¹ compost - 10 t MS ha ⁻¹ an ⁻¹	22

*nombre d'années entre le début de l'essai et le prélèvement de sol. Une année comprend les apports (minéraux et organiques) et la culture au Tchad et les cultures de premier et second cycle en Côte d'Ivoire.

Trois essais constituent le support de l'étude, deux implantés sur la station de Bébédjia au Tchad (B1 et B4) et un sur la station de Gagnoa en Côte d'Ivoire (G). Les prélèvements de sol ont été réalisés sur l'essai B1 après une année d'application des traitements, sur l'essai B4 après quatre années d'application des traitements, et sur l'essai G après 11 et 22 années (Tableau 15).

3.2.1.1. Station de Bébédjia (08° 41' de latitude nord ; 16° 34' de longitude ouest)

La station de Bébédjia est localisée au sud du Tchad dans le bassin cotonnier. Le climat est de type soudanien (alternance d'une saison sèche et d'une saison humide) avec une pluviosité moyenne annuelle de 1000 mm. Les sols des essais appartiennent à la classe des Alfisols (Haplustalfs) qui se sont développés sur matériaux sédimentaires sablo-argileux du Continental Terminal.

L'essai B1 a été implanté en 1993. Il compare, sur une rotation cotonnier/maïs, la fourniture d'éléments minéraux équilibrant les exportations par les cultures sous forme soit d'engrais minéral, soit de MO préhumifiée (fumier), soit de MO non humifiée (paille de jachère). Le dispositif est un factoriel à deux facteurs hiérarchisés (huit répétitions) avec quatre traitements principaux : fumier épandu à 8 t ha⁻¹ ; fumier épandu à 4 t ha⁻¹ ; paille de jachère enfouie à 10 t ha⁻¹ ; paille de jachère enfouie à 5 t ha⁻¹) et trois traitements secondaires : témoin sans engrais ni MO ; apports d'engrais minéral et apports de MO. Les fortes doses de MO sont équivalentes à l'engrais minéral pour les apports de N, les faibles doses pour les apports de K. Le traitement apport minéral était en 1993 le suivant : 63 kg ha⁻¹ de N (28.5 kg à la levée et 34.5 kg à 35 j après levée), 18 kg ha⁻¹ de P₂O₅ et 28.5 kg ha⁻¹ de K₂O à la levée. Les traitements concernés par les prélèvements de sols pour le fractionnement sont : traitement sans engrais ni MO (0) et traitement fumier à 8 t ha⁻¹ (M).

L'essai B4 a été implanté en 1991. Il compare, sur une rotation cotonnier/maïs, les effets de différents types de MO et modalités d'apport. Le dispositif est un factoriel à trois facteurs hiérarchisés (trois répétitions) avec en facteur principal la fréquence des apports (deux traitements : apports annuels et apports un an sur deux), en facteur intermédiaire le type de MO apporté (huit traitements : huit types de MO dont quatre préhumifiées et quatre non compostées) et en dernier facteur le régime d'apports organo-minéral (trois traitements : témoin sans apport

Tableau 16 : caractéristiques physico-chimiques initiales des sols (0-20 cm) des essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.

	Essais		
	B1	B4	G
Granulométrie classique			
Argile (g kg ⁻¹)	75	49	260
Limon fin (g kg ⁻¹)	2,9	46	40
Limon grossier (g kg ⁻¹)	40	43	40
Sable fin (g kg ⁻¹)	224	190	300
Sable grossier (g kg ⁻¹)	632	672	350
C total (g kg ⁻¹)	6,0	2,6	10,8
N total (g kg ⁻¹)	0,54	0,26	1,07
P assimilable Olsen (mg kg ⁻¹)	105	19	n.d.
Ca échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	3,6	1,04	3,2
Mg échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	0,51	0,18	0,53
K échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	0,20	0,08	0,14
Na échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	0,03	0,03	0,02
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	4,30	1,43	5,80
pH eau	n.d.	5,4	5,5

B1 : moyenne des analyses de sol des parcelles témoins après une année de culture, B4 et G : analyses de sol avant mise en culture.

Réactifs utilisés pour la détermination du complexe d'échange : chlorure de cobaltihexammine pour les essais B1 et B4, acétate d'ammonium pour l'essai G.

N.d. : pas de données.

organique ; apport de MO à 10 t ha⁻¹ seule et apport de MO à 10 t ha⁻¹ avec un supplément de 46 kg ha⁻¹ de N à la levée). Les traitements concernés par les prélèvements de sols pour le fractionnement sont : témoin sans apport organique (0) et traitements apport annuel de fumier d'étable (M).

Ces deux dispositifs sont assez complexes mais leur intérêt réside dans le nombre important de parcelles témoins et dans le fait que les parcelles sans apports et avec apports organiques sont

le plus souvent côte à côte et dans tous les cas très proches. Cette proximité renforce le caractère démonstratif des essais et rend les comparaisons plus précises.

3.2.1.2. Station de Gagnoa (06° 08' de latitude nord ; 5° 56' de longitude ouest)

La station de Gagnoa est située dans la région centre-sud de la Côte d'Ivoire en zone forestière. Le climat est de type tropical humide (une saison sèche de quatre mois suivie par une période humide à répartition bimodale des précipitations permettant la réalisation de deux cycles de culture par an) avec une pluviosité annuelle moyenne de 1500 mm. Le sol de l'essai appartient à la classe des Alfisols (Udalfs) développés sur altérite de roche granitoïde.

Le dispositif de l'essai G a été décrit par ailleurs, (Pichot *et al.*, 1977 ; Chabalier, 1986). Il s'agit d'un factoriel en blocs (huit répétitions), le facteur apport organique (deux traitements : 0 et 10 t MS ha⁻¹ an⁻¹ de compost) étant croisé avec le facteur doses N (six traitements : de 0 à 200 kg ha⁻¹ avec un pas de 40 kg ha⁻¹). La culture de premier cycle est systématiquement un maïs, celle du second cycle un second maïs remplacé ensuite par un soja et un niébé.

Les caractéristiques physico-chimiques initiales des sols des trois essais figurent au Tableau 16.

3.2.2. Echantillons de sols fractionnés

Deux répétitions indépendantes de chaque sol sont constituées à partir de mélanges de répétitions des essais (Tableau 17) et constituent les répétitions "de terrain". Chaque fractionnement est réalisé deux fois sur chaque répétition de terrain en vue d'estimer la variabilité des résultats de la méthode, donnant lieu à des répétitions "de laboratoire". Les prélèvements de sols sont effectués sur une profondeur de 0 à 20 cm, correspondant à l'horizon de sol travaillé, en fin de saison sèche au Tchad (avril/mai) et pendant la seconde saison sèche en Côte d'Ivoire (décembre/février).

Tableau 17 : constitution des échantillons de sols M (avec apport organique) fractionnés. Les échantillons 0 (sans apport) sont constitués avec les parcelles témoins correspondantes.

	Répé- tition	Facteur 1 essai*	Facteur 2 essai**	Facteur 3 essai***	Répétitions essai
B1-M	1	fumier 8 t ha ⁻¹	apport matière organique	-	1
	2	fumier 8 t ha ⁻¹	apport matière organique	-	mélange répétitions 2 et 3
B4-M	1	apports annuels	fumier étable 10 t ha ⁻¹	apport matière organique seule	répétition 1
	2	apports annuels	fumier étable 10 t ha ⁻¹	apport matière organique seule	mélange répétitions 2 et 3
G11-M	1	compost 10 t ha ⁻¹	mélange doses azote 1 à 3	-	mélange toutes répétitions
	2	compost 10 t ha ⁻¹	mélange doses azote 4 à 6	-	mélange toutes répétitions
G22-M	1	compost 10 t ha ⁻¹	mélange doses azote 1 à 3	-	mélange toutes répétitions
	2	compost 10 t ha ⁻¹	mélange doses azote 4 à 6	-	mélange toutes répétitions

* facteur 1 essai : pour B1, type et doses de matière organique ; pour B4, fréquences des apports ; pour G, doses de matière organique. **facteur 2 essai : pour B1, régime d'apport ; pour B4, type de matière organique ; pour G, doses d'azote. *** facteur 3 essai : pour B4, type d'apport organo-minéral.

3.2.3. Fractionnements granulométriques du sol et déterminations des teneurs en C et N

L'analyse de granulométrie classique du sol en cinq fractions a été réalisée sur granulomètre automatique "Granulostat" après destruction de la MO par attaque à l'eau oxygénée et mise en suspension des argiles avec un mélange hexamétophosphate et carbonate de sodium. Les cinq fractions granulométriques obtenues sont les suivantes : argile (A) de taille 0-2 µm, limon

Tableau 18 : effet des apports organiques sur la teneur en C et N du sol pour les essais B1, B4 (Bébédjia, Tchad) et G (Gagnoa, Côte d'Ivoire).

Essai	Ancien- neté des apports (années)*	Type et dose matière organique	Profondeur de sol prélevé	Teneur ** en C (g kg ⁻¹ de sol)		Teneur** en N (g kg ⁻¹ de sol)	
				Sans apport	Avec apport	Sans apport	Avec apport
B1	1	fumier 8 t ha ⁻¹ an ⁻¹	0-20 cm	5,5 b	6,6 a	0,48 b	0,57 a
			20-40 cm	3,1	3,2	0,34	0,37
B4	4	fumier 10 t ha ⁻¹ an ⁻¹	0-20 cm	2,3 b	2,8 a	0,24 b	0,31 a
G	11	compost 10 t ha ⁻¹ an ⁻¹	0-20 cm	9,2 b	11,4 a	0,82 b	1,01 a

* ancienneté des apports : voir tableau 15 ** les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$.

fin (Lf) de taille 2-20 μm , limon grossier (Lg) de taille 20-50 μm , sable fin (Sf) de taille 50-200 μm et sable grossier (Sg) de taille 200-2000 μm .

Les mêmes fractions sans destruction de la MO ont été isolées en procédant à un fractionnement granulométrique du sol selon la méthode décrite par Gavinelli *et al.* (1995). Outre ces cinq fractions, une certaine quantité de C organique et N organique et minéral solubles dans l'eau constitue la fraction hydrosoluble (So). 20 à 30 g de sol tamisé à 2 mm sont mis en agitation (50 rev min⁻¹) pendant 2 h avec 200 ml d'eau, 0.5 g d'hexamétophosphate de sodium et cinq billes. La solution est tamisée pour récupérer les fractions Sg et Sf après séchage à l'étuve (60°C). La solution restante est traitée aux ultrasons pendant 10 min (appareil Intensity Ultrasonic Processor avec 70% de cycle actif) puis tamisée pour récupérer la fraction Lg. La fraction A est séparée de la fraction Lf par décantation et siphonage en utilisant le principe de la loi de Stokes, puis récupérée par précipitation par ajout de chlorure de strontium, ultracentrifugation et séchage à l'étuve. La manipulation est répétée jusqu'à épuisement de la fraction A. La fraction Lf est alors récupérée par séchage. Une aliquote de la première solution surnageant le précipité de la fraction A contenant la fraction So est conservée pour les dosages (C et N organique et N minéral). Les ultrasons ne sont appliqués que sur les fractions de taille inférieure à 50 μm pour éviter le risque de diviser les débris végétaux en fractions plus fines (Feller *et al.*, 1991).

Les dosages du C et N des sols totaux et des cinq fractions sont réalisés sur analyseur élémentaire Fisons EA 1108 W après broyage. Le dosage du C soluble est effectué sur appareil Shimadzu Toc 5000, N minéral est dosé par colorimétrie à flux continu et N organique soluble déterminé après une minéralisation Kjeldhal.

3.3. Résultats

3.3.1. Effet des apports organiques sur la teneur en C et N des sols

Des prélèvements et analyses de sol par parcelles élémentaires ont été réalisés sur B1 et B4 un et quatre ans respectivement après le début de l'essai, et sur G après 11 ans permettant une analyse statistique des résultats.

Les trois essais font apparaître une augmentation significative de la teneur en C et N des parcelles ayant reçu des apports organiques préhumifiés sur une profondeur de 0 à 20 cm (Tableau 18). Une telle augmentation n'est pas mise en évidence pour la profondeur 20-40 cm sur B1.

3.3.2. Résultats du fractionnement granulométrique du sol avec MOS

3.3.2.1. Qualité des fractionnements réalisés

Le processus de fractionnement granulométrique du sol sans destruction de la MO est long et délicat. Les résultats dépendent de la qualité de sa réalisation et il convient de tester leur validité. La qualité des fractionnements réalisés s'évalue par deux types de vérifications :

- le sol doit être l'addition des fractions pour ce qui est des caractéristiques chimiques non altérées par la méthode de fractionnement,
- les granulométries de sol avec et sans destruction de la MOS doivent être comparables.

Sol total et somme des fractions peuvent être comparés pour la masse (somme de la masse des fractions récupérées par rapport à la masse du sol de départ), et les contenus en C et N. La moyenne des 32 fractionnements fait apparaître une somme des fractions égale au sol de départ en ce qui concerne la masse, mais légèrement inférieure pour le contenu en C et supérieure pour

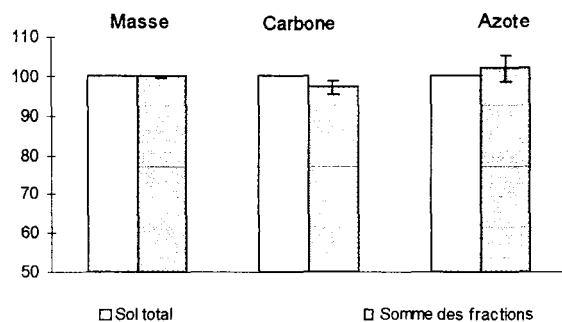


Figure 15 : comparaisons entre les échantillons de sol total et leurs fractions granulométriques. Moyennes et intervalles de confiance (à 95%) des rapports de la somme des fractions au sol total (base 100) de 32 fractionnements pour la masse et les contenus en carbone et azote.

le contenu en N (figure 15). Il existe donc un biais faible (inférieur à 5%) pour l'évaluation de C et N contenus dans les fractions. Ce biais ne peut être le résultat de pertes de matières au cours de la manipulation, étant donné que les C et N solubles sont mesurés et que les écarts sur la détermination de C et N sont opposés. Les fractions de la taille des sables ont des teneurs très faibles en C et N. Les biais peuvent provenir de l'imprécision des dosages de ces faibles valeurs qui seraient sous-estimées pour C et surestimées pour N.

La dispersion des résultats des fractionnements autour de ces moyennes est très faible pour

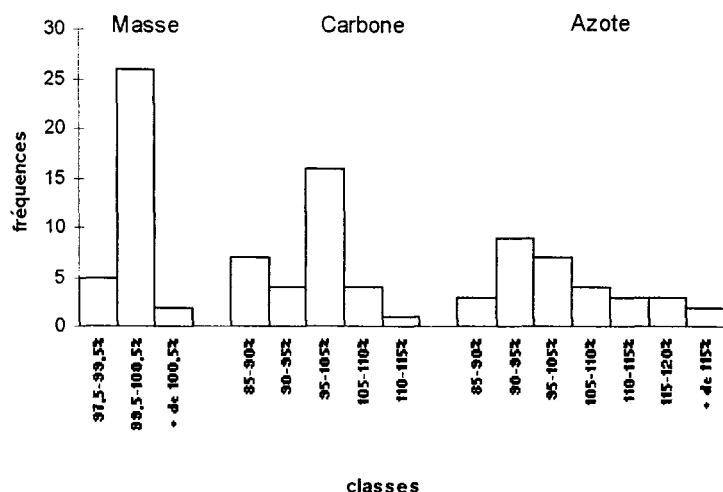


Figure 16 : variabilité des rapports de la somme des fractions au sol total (base 100) de 32 fractionnements pour la masse et les contenus en carbone et azote.

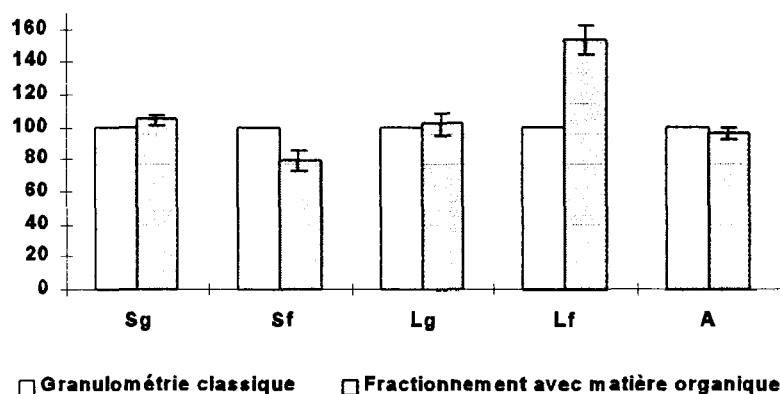


Figure 17 : comparaisons des résultats de 32 fractionnements avec et sans destruction de la matière organique. Moyennes et intervalles de confiance (à $p < 0.05$) des résultats du fractionnement sans destruction de la matière organique rapportés à ceux du fractionnement avec destruction de la matière organique (base 100).

la masse, plus importante pour C : entre 87 et 112% du carbone du sol total, et surtout pour N : entre 87 et 130% de N du sol total (figure 16). La plus grande dispersion pour les résultats de détermination de N peut aussi provenir du fait que son dosage est moins précis que celui de C.

La comparaison entre les résultats de la granulométrie classique et du fractionnement du sol avec MO fait apparaître deux biais (figure 17). La proportion de Sg est plus importante et celle de Sf moins importante avec le fractionnement sans destruction de la MO qu'avec la granulométrie classique. La séparation des deux fractions n'est pas complète. De même, les fractions Lf et A ne sont pas parfaitement séparées, ce qui entraîne dans le fractionnement sans destruction de la MO une proportion de Lf du sol fortement surestimée du fait de leur faible importance dans ces sols. En dehors de ces deux biais peu marqués et concernant des fractions voisines, les résultats des fractionnements avec et sans destruction de la MO sont proches.

3.3.2.2. Précisions des données issues des fractionnements

Les termes suivants seront utilisés :

- "teneur" en C (N) des fractions quand les résultats sont exprimés en gC (gN) de fraction par kg de fraction,

Tableau 19 : variabilité des mesures sur les fractions granulométriques obtenues sans destruction de la matière organique : CV obtenus à partir de deux fractionnements par échantillon de sol, sur 16 échantillons.

	Sable grossier	Sable fin	Limon grossier	Limon fin	Argile	C et N organique s solubles	N minéral
Proportion de la masse du sol total	2,8	8,5	8,8	3,8	3,3	-	-
C Teneur	13,9	11,4	11,0	4,8	1,8	-	-
C Contenu	16,4	13,7	16,8	7,7	2,8	4,2	-
Proportion du C du sol total	18,4	10,9	14,9	6,7	2,7	5,6	-
N Teneur	27,3	8,6	12,2	11,1	3,1	-	-
N Contenu	21,7	12,7	18,8	12,4	4,1	15,3	18,6
Proportion du N du sol total	15,9	11,2	16,2	12,5	5,0	14,6	49,1

- “contenu” en C (N) des fractions quand les résultats sont exprimés en gC (gN) de fraction par kg de sol total.

Les proportions en masse totale ou masse de C (N) des fractions par rapport à la masse totale ou masse de C (N) du sol total sont exprimés en g kg⁻¹.

La réalisation de deux fractionnements par sol étudié permet d’estimer la précision des données obtenues. La variance d’une donnée x mesurée sur n échantillons avec deux fractionnements par échantillon est estimée par la formule :

$$Var(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_{i1} - x_{i2})^2}{2}$$

x_{i1} et x_{i2} étant le couple de mesures de la donnée x du i^{ème} fractionnement.

Le Tableau 19 donne les coefficients de variation calculés à partir de ces variances. En ce qui concerne les mesures directes, les coefficients de variation sont faibles pour la proportion de

masse totale des fractions par rapport à la masse totale du sol total, plus importants pour la teneur en C, et encore supérieurs pour la teneur en N. Pour les teneurs en C et N, la précision des données est en fonction inverse de la taille des fractions. La précision des données est bien liée à la précision de la mesure effectuée (par exemple, la précision d'une pesée est supérieure à celle d'un dosage de C ou N, ces dosages étant moins précis quand la teneur est faible). La détermination des contenus et des proportions s'effectue avec des CV plus élevés que celle des teneurs. Ceci provient du fait qu'il s'agit de données calculées à partir des données précédentes.

3.3.3. Caractéristiques des fractions

Les fractions des sols des trois essais présentent des caractéristiques proches (Tableau 20). La masse de la fraction Sg est prépondérante (figure 18) mais plus importante pour les essais B1 et B4 (80% du sol) que pour l'essai G (près de 50% du sol). A l'opposé, la masse de la fraction A est faible sur B1 et B4 (5% du sol), mais plus importante sur l'essai G (20% du sol). Les teneurs en C et N des fractions varie en fonction inverse de leur taille. Les teneurs en C et N des fractions Sg sont extrêmement faibles. La répartition du C et N du sol entre les différentes fractions est semblable sur les deux sites : plus de la moitié du C et N du sol est localisée dans la fraction A du sol pourtant de faible importance en masse. Les valeurs du rapport C/N sont décroissantes des fractions grossières aux fractions fines sur l'essai G, mais cette décroissance ne s'observe pas sur les essais B1 et B4.

3.3.4. Impacts des apports organiques sur les fractions de MOS

Sur tous les essais, les apports d'amendements organiques ont provoqué une augmentation des teneurs en C et N du sol pour l'horizon travaillé. De façon générale, c'est l'ensemble des fractions qui est concerné par cette augmentation, à l'exception de la fraction So (figure 19). Les fractions Sg et Sf contribuent de façon importante et constante à cette augmentation (figure 20). Les fractions Lg et Lf d'une part et A et So réunies d'autre part participent de façon importante à l'augmentation du C et N du sol pour l'essai G, mais dans une moindre mesure pour N et de façon non systématique pour C pour les essais B1 et B4.

Tableau 20 : résultats des fractionnements sans destruction de la matière organique ; essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, 11 (G11) et 22 (G22) années après la mise en place de l'essai ; 0 : sans apport organique, M : avec apport organique ; moyennes des 2 répétitions de terrain et 2 répétitions de laboratoire.

Echan- tillons	Fractions	Masse (g kg ⁻¹)	C			N			C/N
			Teneur (gC kg ⁻¹ fraction)	Contenu (gC kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (gN kg ⁻¹ fraction)	Contenu (gN kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
B1-0	200-2000 µm	698	0,56	0,40	71	0,050	0,035	89	11
	50-200 µm	160	2,53	0,36	64	0,169	0,025	62	14
	20-50 µm	160	7,79	0,27	47	0,630	0,021	55	11
	2-20 µm	33	37,41	1,77	316	1,900	0,091	227	20
	0-2 µm	47	39,96	2,44	441	2,992	0,184	451	13
	Solubles			0,25	45		0,058	106	4
	Somme fractions	999		5,49	983		0,413	1029	
	Sol non fractionné		5,58			0,406			14
B1-M	200-2000 µm	723	1,00	0,73	116	0,050	0,037	79	27
	50-200 µm	129	4,24	0,54	86	0,286	0,036	77	15
	20-50 µm	129	9,42	0,30	47	0,646	0,021	44	15
	2-20 µm	31	42,83	2,14	342	2,108	0,105	224	20
	0-2 µm	50	38,18	2,57	409	2,741	0,184	394	14
	Solubles			0,23	36		0,056	78	4
	Somme fractions	1000		6,51	1036		0,439	937	
	Sol non fractionné		6,29			0,469			13
B4-0	200-2000 µm	730	0,24	0,17	64	0,012	0,009	48	594
	50-200 µm	138	1,15	0,16	58	0,083	0,011	57	14
	20-50 µm	138	4,19	0,12	47	0,303	0,009	45	14
	2-20 µm	30	16,75	0,74	273	0,926	0,039	199	19
	0-2 µm	45	25,87	1,38	514	1,891	0,101	509	14
	Solubles			0,19	72		0,041	146	5
	Somme fractions	997		2,76	1028		0,211	1068	
	Sol non fractionné		2,69			0,198			14

Tableau 20 (suite).

Echan- tillons	Fractions	Masse (g kg ⁻¹)	C			N			C/N
			Teneur (gC kg ⁻¹ fraction)	Contenu (gC kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (gN kg ⁻¹ fraction)	Contenu (gN kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
B4-M	200-2000 µm	746	0,38	0,28	95	0,036	0,027	112	11
	50-200 µm	134	1,97	0,25	82	0,177	0,023	92	11
	20-50 µm	134	4,95	0,15	50	0,418	0,013	52	12
	2-20 µm	30	15,40	0,66	220	1,010	0,043	177	16
	0-2 µm	43	30,48	1,38	458	2,348	0,107	438	13
	Solubles			0,22	73		0,050	171	5
	Somme fractions	999		2,94	979		0,263	1076	
	Sol non fractionné		3,01			0,245			12
G11-0	200-2000 µm	394	1,22	0,48	54	0,066	0,026	29	24
	50-200 µm	221	2,19	0,48	55	0,176	0,039	43	12
	20-50 µm	221	10,66	0,36	41	0,785	0,027	31	14
	2-20 µm	33	19,22	1,27	142	1,811	0,117	132	11
	0-2 µm	66	15,67	4,27	481	1,850	0,504	566	8
	Solubles			0,95	108		0,177	110	5
	Somme fractions	986		7,81	881		0,890	1001	
	Sol non fractionné		8,87			0,892			10
G11-M	200-2000 µm	431	1,89	0,82	79	0,128	0,055	55	15
	50-200 µm	206	4,09	0,83	80	0,316	0,064	63	13
	20-50 µm	206	14,37	0,46	44	1,081	0,035	35	14
	2-20 µm	30	23,76	1,77	170	2,094	0,156	153	11
	0-2 µm	74	18,48	4,81	462	2,238	0,583	575	8
	Solubles			1,06	102		0,168	102	6
	Somme fractions	1002		9,74	937		1,062	1047	
	Sol non fractionné		10,41			1,018			10

Tableau 20 (fin).

Echan- tillons	Fractions	Masse (g kg ⁻¹)	C			N			C/N
			Teneur (gC kg ⁻¹ fraction)	Contenu (gC kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (gN kg ⁻¹ fraction)	Contenu (gN kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
G22-0	200-2000 µm	498	1,43	0,71	106	0,071	0,035	54	20
	50-200 µm	178	2,43	0,43	64	0,186	0,033	50	13
	20-50 µm	178	9,73	0,29	44	0,735	0,022	34	14
	2-20 µm	28	15,69	1,17	177	1,406	0,106	164	11
	0-2 µm	75	15,08	3,44	515	1,730	0,395	606	9
	Solubles			0,79	117		0,066	86	17
	Somme fractions	1008		6,83	1022		0,657	1009	
	Sol non fractionné		6,68			0,651			10
G22-M	200-2000 µm	545	2,03	1,11	122	0,159	0,087	106	13
	50-200 µm	160	5,11	0,78	85	0,383	0,057	70	14
	20-50 µm	160	15,52	0,45	49	1,155	0,034	41	14
	2-20 µm	27	22,16	1,44	158	1,936	0,126	153	11
	0-2 µm	65	18,72	3,70	407	2,067	0,409	499	9
	Solubles			0,79	87		0,086	83	9
	Somme fractions	995		8,28	908		0,799	973	
	Sol non fractionné		9,12			0,822			11

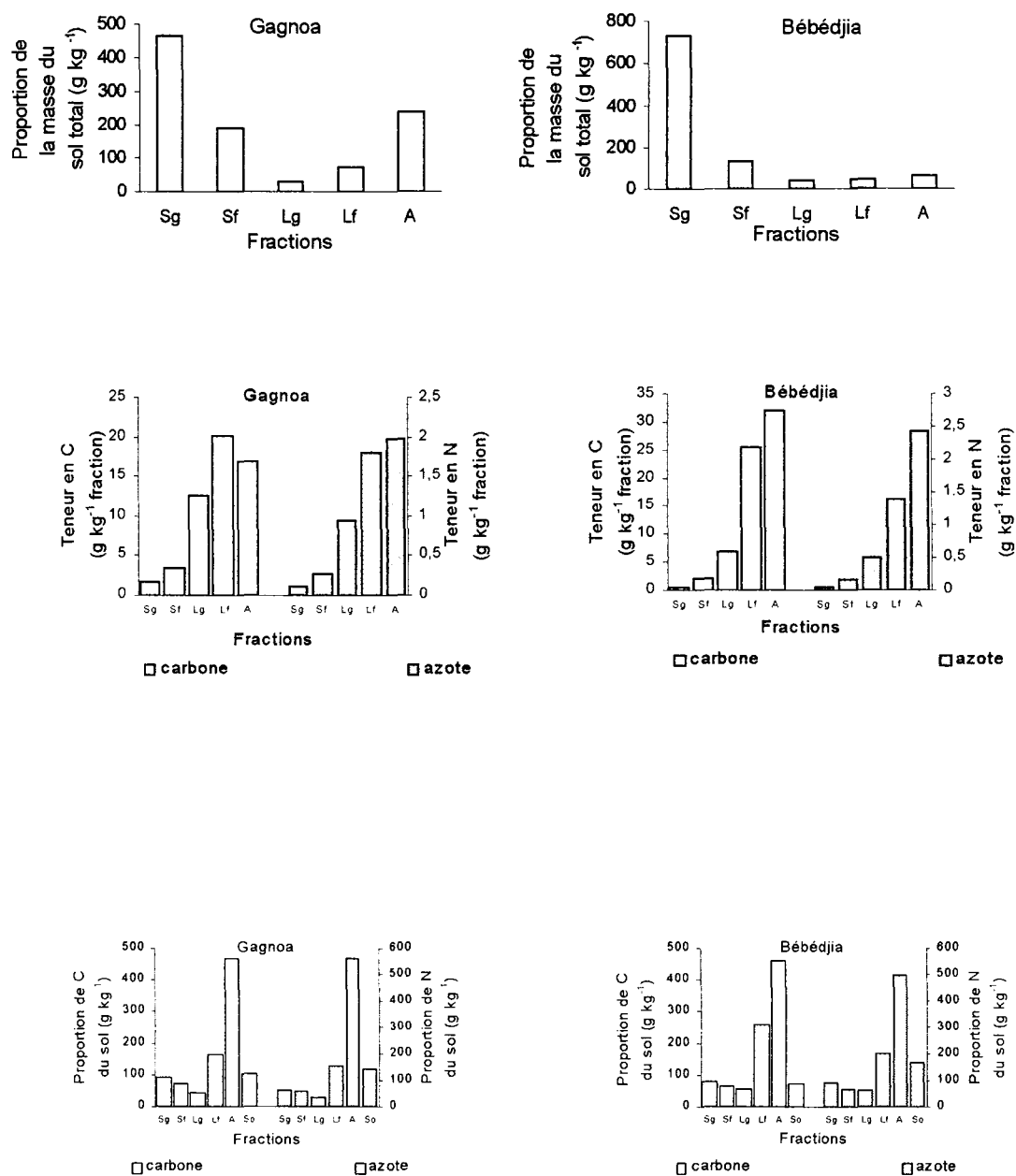


Figure 1 : proportions de la masse du sol total, teneurs en C et N, proportions du C et N du sol total et rapports C/N des fractions sable grossier (Sg), sable fin (Sf), limon grossier (Lg), limon fin (Lf) argile (A) et soluble (So). Moyennes des fractionnements réalisés sur l'essai G (Gagnoa, Côte d'Ivoire, 8 sols) et les essais B1 et B4 (Bébédjia, Tchad, 8 sols).

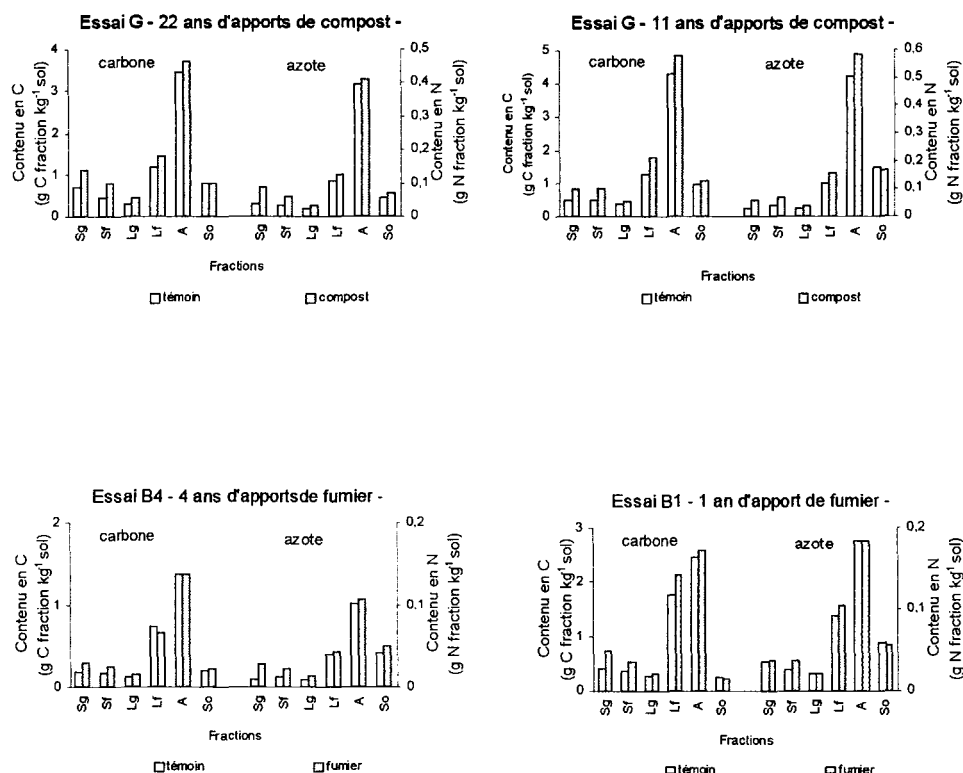


Figure 19 : impacts des apports organiques sur les contenus en C et N des différentes fractions sur l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire (22 et 11 ans d'apports de compost), sur l'essai B4, Bébédjia, Tchad (4 ans d'apports de fumier) et sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad (1 an d'apport de fumier).

3.4. Discussion

3.4.1. Effet du mode de gestion des sols sur les différentes fractions de matière organique du sol

La principale conclusion de cette étude réside dans le fait que toutes les fractions granulométriques participent à l'augmentation du stock organique des sols consécutive à des apports de fumier ou compost. L'augmentation des fractions fines de MOS est toutefois plus nette

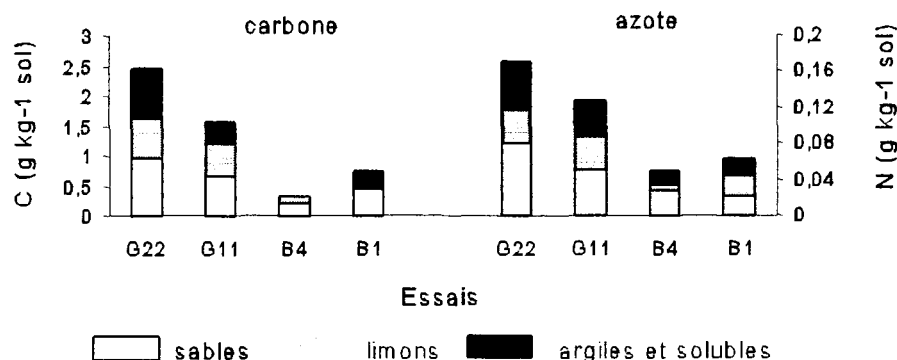


Figure 20 : répartition de l'augmentation de C et N du sol occasionnée par les apports organiques selon les fractions. Essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire (22 et 11 ans d'apports de compost) ; essai B4, Bébédjia, Tchad (4 ans d'apports de fumier) et essai B1, Bébédjia, Tchad (1 an d'apport de fumier).

sur l'essai G avec un sol plus argileux après 11 et 22 ans de répétition des apports organiques que sur B1 et B4 avec une et quatre années d'apports. Des résultats différents ont été reportés d'un essai à Bambey au Sénégal sur sol sableux (Feller *et al.* 1983) où l'enfouissement de compost ne permettait l'augmentation que des seules fractions de la taille des sables. L'augmentation des fractions fines de MOS par des techniques culturales appropriées (apports organiques, mises en jachère ou prairie) est donc observée de façon évidente quand la proportion d'argile dans le sol est importante (Feller, 1997). Ce résultat est moins constant et moins perceptible en sol sableux. Une hypothèse permettant d'expliquer ces différences serait le rôle protecteur des argiles vis à vis de la MOS (Hassink, 1987) qui s'appliquerait davantage aux fractions fines de la MOS permettant aux sols argileux de mieux préserver les augmentations de MO fines occasionnées par ces techniques culturales.

3.4.2. Application du modèle de Hénin-Dupuis aux fractions de matière organique du sol

Sur l'essai G, les teneurs en C et N du sol total et des différentes fractions des parcelles témoin et des parcelles avec apports organiques annuels et constants ont été mesurées à 11 et 22 années après le début de l'essai. Ces données permettent la détermination des paramètres du modèle de Hénin-Dupuis. Selon ce modèle (Hénin et Dupuis, 1945), la MOS forme un compartiment soumis à des entrées annuelles constantes et des sorties (minéralisation)

proportionnelles à son importance :

pendant dt (une année) :

$$\text{entrées} = k_1 M$$

$$\text{sorties} = k_2 Y$$

(si les entrées sont constituées de plusieurs types de MO, ce qui est généralement le cas, les

entrées sont égales à : $\sum_i k_{1i} M_i$) et en intégrant :

$$Y(t) = \frac{k_1 M}{k_2} - \left(\frac{k_1 M}{k_2} - A_0 \right) e^{-k_2 t} \quad (1)$$

avec $A_0 = Y$ à $t = 0$; M la quantité annuelle de MO entrant sur la parcelle k_1 le coefficient isohumique propre à cette MO ; k_2 le coefficient de minéralisation de la MOS et Y la quantité de MOS (C ou N contenu dans les 20 premiers cm de sol). Le passage de teneurs en C et N en quantité de C et N s'effectue en considérant une densité apparente du sol constante de 1.5).

le niveau de la MOS sera alors à l'équilibre donné par la formule (2) :

$$Y_{\text{équilibre}} = \frac{k_1 M}{k_2} \quad \text{Si } M = 0 \text{ alors } Y_{\text{équilibre}} = 0$$

La demi-vie de la MO, c'est à dire le temps nécessaire pour que la moitié de la MO devant se minéraliser le fasse effectivement, exprimé en années, est donné par la formule

$$(3) : T_{\text{demi-vie}} = \frac{\ln 2}{k_2}$$

Si on fait l'hypothèse que les parcelles ont la même valeur initiale de Y à $t = 0$ et que la différence d'entrées entre les deux parcelles témoin et avec apport organique est constituée du seul compost, on obtient à partir de (1) la possibilité de déterminer $k_1 M$ (et k_1 connaissant M , la quantité annuelle de C ou N apportée par le compost), k_2 et A_0 connaissant la différence $Y_{\text{mo}} - Y_{\text{témoin}}$ à $t_1 = 11$ et $t_2 = 22$.

Tableau 21 : détermination des paramètres du modèle de Hénin-Dupuis appliqué au sol total et aux fractions granulométriques pour C et N (essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire).

1° sol total			
$k_1 = 0,18$			
$k_2 = 0,09$; demi-vie = 8 ans			
2°) deux compartiments : fractions supérieures et inférieures à 20 microns			
C	>20 μm	< 20 μm	
	$k_1 = 0,11$	$k_1 = 0,09$	
	$k_2 = 0,19$	$k_2 = 0,06$	
	demi-vie = 4 ans	demi-vie = 12 ans	
3°) trois compartiments : fractions sables, limons et argiles			
	Sables	Limons	Argiles
	$k_1 = 0,19$	$k_1 = 0,05$	$k_1 = 0,03$
	$k_2 = 0,35$	$k_2 = 0,07$	$k_2 = 0,04$
	demi-vie = 2 ans	demi-vie = 10 ans	demi-vie = 17 ans
1° sol total			
$k_1 = 0,20$			
$k_2 = 0,09$; demi-vie = 8 ans			
2°) deux compartiments : fractions supérieures et inférieures à 20 microns			
N	>20 μ	< 20 μ	
	$k_1 = 0,10$	$k_1 = 0,11$	
	$k_2 = 0,12$	$k_2 = 0,07$	
	demi-vie = 6 ans	demi-vie = 10 ans	
3°) trois compartiments : fractions sables, limons et argiles			
	Sables	Limons	Argiles
	$k_1 = 0,10$	$k_1 = 0,11$	$k_1 = 0,04$
	$k_2 = 0,13$	$k_2 = 0,22$	$k_2 = 0,02$
	demi-vie = 5 ans	demi-vie = 3 ans	demi-vie = 35 ans

Ce modèle peut être appliqué à la MOS du sol total et aux différentes fractions. On obtient alors les coefficients figurant au Tableau 21. Le fait de pouvoir déterminer des valeurs cohérentes

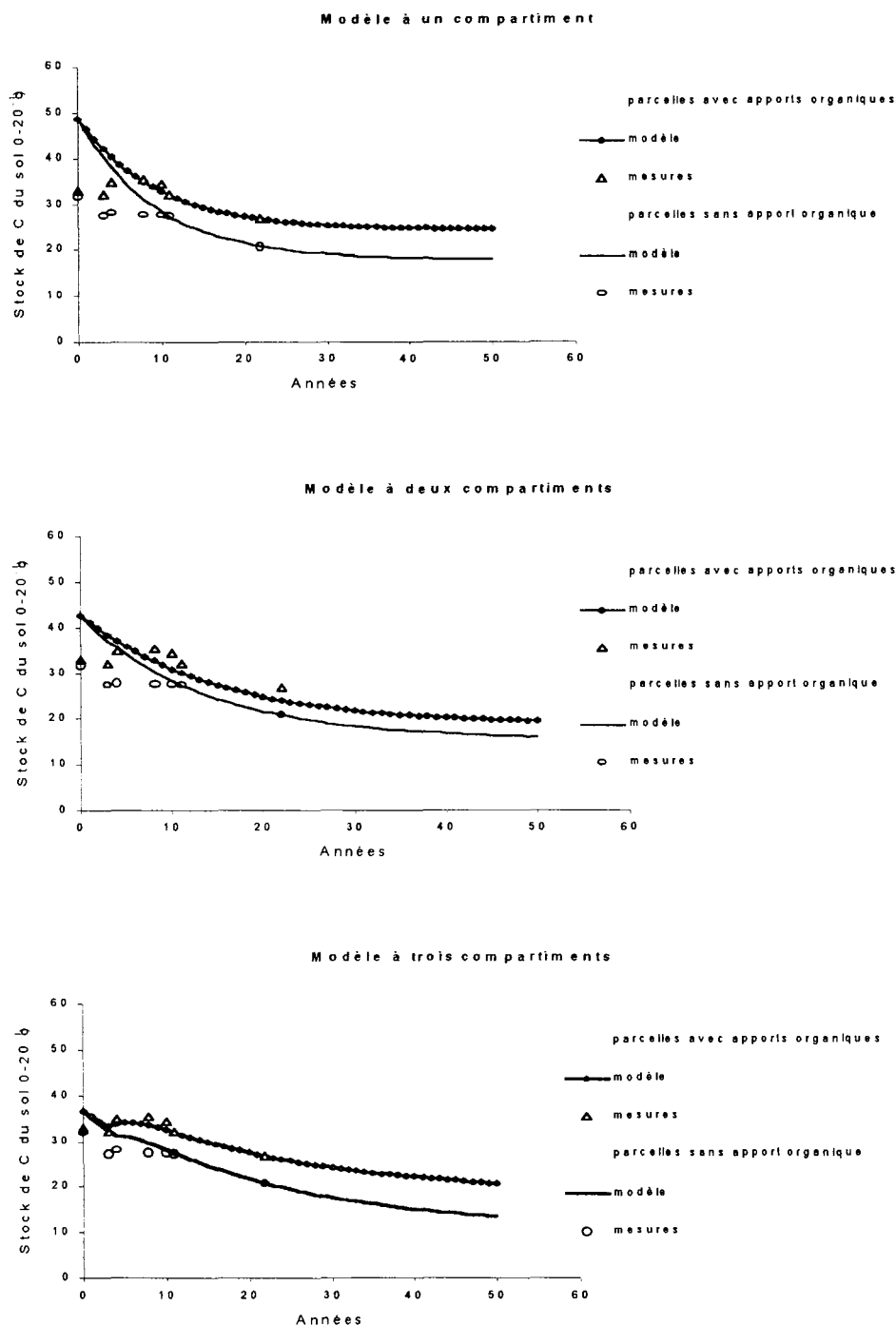


Figure 21 : mesures et prévisions du stock de C dans les 20 premiers centimètres de sol de l'essai G de Gagnoa, Côte d'Ivoire, par trois modèles. Modèle à un compartiment : modèle de Hénin appliqué au sol total ; modèle à deux compartiments : somme de deux modèles de Hénin appliqués aux fractions supérieures et inférieures à 20 μ m. Modèle à trois compartiments : somme de trois modèles de Hénin appliqués aux fractions sables, limons et argiles + solubles.

de ces coefficients (comprises entre 0 et 1) est un test positif pour la validation du modèle. Ceci ne constitue cependant ni une condition nécessaire ni une condition suffisante :

- il est possible de ne pas obtenir de telles valeurs si une des hypothèses de départ n'est pas remplie : situation initiale non homogène ou entrées de biomasse non constante d'une année sur l'autre en raison de rendements fluctuants par exemple,
- l'imprécision dans les dosages de C et N peut aboutir également à l'impossibilité de déterminer les paramètres,
- mais il est possible également de faire passer par deux points plusieurs modèles : c'est le cas ici puisque les différentes hypothèses (sol total, deux et trois compartiments de sol correspondant aux fractions granulométriques) correspondent à différents modèles incompatibles³.

Une indication de la validité de ces modèles peut être fournie par l'adéquation entre les valeurs initiales de C calculées et les mesures réalisées sur l'essai G (figure 21). Le modèle faisant fonctionner trois compartiments s'avère plus proche de la réalité que le modèle à deux compartiments, lui-même plus proche que le modèle de Hénin appliqué au sol total.

Le modèle de Hénin-Dupuis appliqué aux fractions granulométriques ne représente pas forcément la réalité. En effet, selon ce modèle, les fractions évoluent de façon indépendante les unes des autres. Mais ce modèle permet de prévoir leur cinétique, celle-ci n'étant pas fortement différente si les entrées d'une des fractions dépend des sorties d'une autre fraction.

3.4.3. Conséquences sur la cinétique des différentes fractions

Le modèle à trois compartiments fait apparaître des cinétiques contrastées selon les fractions granulométriques : les fractions grossières ont un turnover très rapide, mais bénéficient de la plus grande partie des entrées. Les fractions fines se minéralisent par contre plus lentement, mais les entrées dans ce compartiment sont plus faibles. De telles différences entre les coefficients

³ Pour que la somme de deux modèles de Hénin-Dupuis appliqués à deux compartiments soit également un modèle de Hénin-Dupuis appliqué à la somme des deux compartiments, il faut vérifier les relations suivantes entre les différents coefficients (k_1 et k_2 étant les coefficients correspondant au modèle à un compartiment et k'_1 , k''_1 et k'_2 , k''_2 étant les coefficients correspondant au modèle à deux compartiments) : $k_1 = k'_1 + k''_1$ et $k_2 = k'_2 = k''_2$. Si ces égalités ne sont pas respectées, les deux modèles ne peuvent passer que par deux points communs.

Tableau 22 : prévisions des contenus en C (t ha^{-1}) des 20 premiers cm de sol à l'équilibre pour l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, par le modèle de Hénin-Dupuis appliqué au sol total et à trois fractions granulométriques.

		Modèle de Hénin appliqué au sol total	Modèle de Hénin appliqué à trois fractions granulométriques de la matière organique du sol
Parcelles témoins	Sol total	17,2	5,8
	Sable		3,7
	Limon		2,1
	Argile		0
Parcelles avec apports organiques	Sol total	23,9	14,3
	Sable		5,6
	Limon		4,3
	Argile		4,3

de minéralisation des différentes fractions ont déjà été mises en évidence. Jenkinson et Rayner (1977) sur l'essai de Rothamsted ont calculé des demi-vie ($\ln 2/k$) de 0,165 ; 2,31 ; 49,5 et 1980 ans pour les compartiments de MOS des plus labiles aux plus stables. Par la méthode de l'abondance naturelle du C-13 (Balesdent *et al.* 1987), Bonde *et al.* (1992) détermine au Brésil en climat sb-tropical des turnover ($1/k_2$) de 4, 6 et 59 ans pour le C des fractions de la taille respectivement des sables, limon et argile. Par la même méthode en climat tempéré, Arrouays et Péliissier (1994) estiment la demi-vie de la fraction de MOS peu dense à 1,6 an et celle de la fraction de MOS associée aux minéraux à 43 ans.

Le modèle à trois compartiments pronostique à l'équilibre des valeurs de MOS nettement différentes de celles du modèle de Hénin-Dupuis (Tableau 22) : le C du sol total à l'équilibre est plus faible et la différence de C du sol résultant des apports organiques plus élevée. Les prévisions par le modèle à trois compartiments fait état d'importantes différences à l'équilibre entre parcelles ayant ou n'ayant pas reçu d'apports organiques pour la répartition du C des fractions. Les fractions fines de la MOS tendent à disparaître sur le témoin alors qu'elles s'équilibrent avec les fractions grossières pour les parcelles amendées. Malgré une minéralisation moins rapide, la

fraction fine de la MOS peut subir des modifications importantes sur le long terme. Si les états d'équilibre sont très contrastés, les différences jusqu'à 20, voire 30 ans restent beaucoup plus faibles. La détermination des paramètres du modèle par des mesures effectuées à des pas de temps de l'ordre d'une vingtaine d'années peut être imprécis. Des périodes de mesures plus longues, incluant l'observation des états d'équilibres sont nécessaires pour atteindre un niveau supérieur de précision dans la détermination des paramètres du modèle.

3.4.4. Conclusion

Les résultats obtenus confirment que le fractionnement granulométrique de la MOS permet d'obtenir des fractions caractérisées par une cinétique de minéralisation différente. Les fractions fines se minéralisent plus lentement que les fractions grossières, très labiles sous climat tropical. Cependant les fractions fines de la MOS ne sont pas absolument stables et leur évolution peut s'avérer importante sur le long terme. Des apports de fumier ou compost sont à même de maintenir la présence de telles fractions de la MOS ce qui est essentiel compte tenu de leur contribution importante aux propriétés du sol dépendant de la MOS. Des observations sur le long terme des évolutions de fractions granulométriques de MOS permettraient de valider et préciser des modèles susceptibles d'établir des prévisions des propriétés de sols soumis à différentes gestions.

Chapitre 4

**Contribution des fractions
granulométriques de la
matière organique à la
capacité d'échange
cationique des Alfisols :
application aux effets des
amendements organiques**

Chapitre 4

Contribution des fractions granulométriques de la matière organique à la capacité d'échange cationique des Alfisols : application aux effets des amendements organiques

4.1. Introduction

Une grande partie des cultures pluviales annuelles de la zone soudanienne à la zone tropicale humide d'Afrique est implantée sur des sols ayant subi un lessivage plus ou moins important (Oxisols, Alfisols et Ultisols). Leurs horizons de surface présentent généralement une faible capacité d'échange cationique (CEC). Il est courant qu'elle soit inférieure à $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, seuil en dessous duquel existent d'importants risques de lixiviation d'éléments minéraux (Sanchez, 1976). Cette faible CEC résulte d'une faible teneur en argile des horizons considérés et d'une minéralogie de ces argiles dominée par la kaolinite caractérisée par une faible densité de charge. La matière organique des sols (MOS) est la composante principale de la CEC de ces sols (Greenland *et al.*, 1992). De fortes corrélations entre le taux de MOS et la CEC ont pu ainsi être mis en évidence (Brams, 1971 ; Sanchez, 1976 ; Richard et Djoulet, 1985). Les charges assurant les propriétés d'échanges sont essentiellement des charges variables. La CEC de ces sols généralement acides est susceptible d'augmenter avec le pH (Fallavier, 1995).

La mise en culture de ces sols engendre une forte minéralisation de la MOS et une baisse du pH du sol. La CEC tend à diminuer avec le nombre d'années de culture depuis la défriche (Siband, 1974 ; Pieri, 1979). La préservation des capacités de production de ces sols nécessite le maintien, voire l'augmentation de leur CEC. Deux sortes d'action sont possibles : augmenter le pH (chaulage) pour les sols les plus acides et maintenir ou augmenter le taux de MOS dans tous les cas. De nombreuses expérimentations de longue durée en Afrique sub-saharienne permettent de comparer les propriétés chimiques de sols ayant reçu ou non des apports organiques (tableau 23). Les apports de matières organiques accroissent le C et le pH du sol et par conséquent la CEC. Quand des apports organiques occasionnent une diminution de la MOS, la CEC dans ce

Tableau 23 : effets des applications de matière organique (MO) sur la teneur en C, le pH et la capacité d'échange cationique des sols à faible activité argileuse en Afrique sub-saharienne (revue bibliographique d'expérimentations à long-terme).

Site et référence	Type de sol*	Traitement avec MO	Profondeur du prélèvement	Propriétés de sol					
				Teneur en C (g kg ⁻¹)		pH eau		CEC** (cmol _e kg ⁻¹)	
				Apports de MO		Apports de MO		Apports de MO	
				Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec
Gagnoa - Côte d'Ivoire (Pichot <i>et al.</i> , 1977)	Alfisol	10 t ha ⁻¹ de compost (5 applications sur 5 cultures en 3 ans)	0-20 cm	90	115 (+28%)	5,1	5,8	5,11	5,77 (+13%)
Farakô-ba - Burkina Faso (Bado <i>et al.</i> , 1997)	Ferrallitique	5 t ha ⁻¹ de fumier tous les 2 ans pendant 9 ans	0-15 cm	23	36 (+57%)	4,7	5,3	1,41	1,65 (+17%)
Ibadan - Nigéria (Obatolu & Agboola, 1993)	Alfisol	20 t ha ⁻¹ d'engrais vert dans une expérience en serre de 12 mois		130	184 (+42%)	6,3	6,3	4,15	4,96 (+20%)
Thilmakha - Sénégal (Cisse, 1988 ; Cisse & Vachaud, 1988)	Ferrugineux	10 t ha ⁻¹ de fumier tous les 2 ans pendant 10 ans	0-10 cm	10,6	138 (+30%)	5,5	6,0	0,48	0,65 (+35%)
			10-20 cm	12,8	143 (+12%)	5,4	5,6	0,56	0,60 (+7%)
Samaru - Nigéria (Bache & Heathcote, 1968)	Ferrugineux	4,9 t ha ⁻¹ an ⁻¹ de fumier pendant 15 ans	0-15 cm	24	43 (+79%)	5,4	5,8	2,17	2,83 (+30%)
Tama- Niger (Pichot <i>et al.</i> , 1974)	Ferrugineux	10 t ha ⁻¹ an ⁻¹ de paille pendant 3 ans	0-20 cm	16	27 (+69%)	6,1	6,7	1,18	1,62 (+37%)
Saria - Burkina Faso (Pichot <i>et al.</i> , 1981)	Ferrugineux	40 t ha ⁻¹ an ⁻¹ de fumier pendant 16 ans	0-20 cm	24	66 (+175%)	4,5	6,6	2,55	3,60 (+41%)

*Selon la classification française des sols (Aubert, 1968) à Farakô-ba, Thilmakha, Samaru, Saria et Tama ; selon la classification américaine des sols (Soil Survey staff, 1990) à Gagnoa et Ibadan.

**Réactifs et méthodes utilisées : chlorure de cobaltihexamine par quantification des ions cobalt retenus pour les essais de Thilmakha ; acétate d'ammonium (pH 7) par somme des cations déplacés pour les essais d'Ibadan et de Farakô-ba, et par quantification des ions ammonium ions retenus à Gagnoa, Samaru, Tama et Saria.

cas diminue (Tian et Brussaard, 1997). On constate cependant que la variation de la CEC est dans la presque totalité des cas plus faible que celle de la MOS. Ceci s'explique en partie par la contribution des minéraux du sol à la CEC dont la teneur n'est pas modifiée par les traitements. Mais une autre hypothèse susceptible d'expliquer un tel écart serait que toute la MOS ne contribue pas de façon équivalente à la CEC du sol. Identifier les fractions de MOS dont le rôle sur la CEC est déterminant permettrait de mieux évaluer l'efficacité des techniques culturales susceptibles d'améliorer les propriétés d'échange du sol.

La présente étude se propose de procéder à un fractionnement granulométrique de la MOS et de déterminer la contribution de chaque fraction à la CEC du sol. Cette opération est réalisée pour des échantillons de sols provenant de parcelles avec et sans apport organique d'essais implantés à Bébédjia (Tchad) et Gagnoa (Côte d'Ivoire). Le fractionnement granulométrique permet d'obtenir des fractions matérielles sur lesquelles des mesures directes peuvent être réalisées (dosages, mesure de CEC) avec un tri de nature physique, sans recours à des extractants chimiques susceptibles de modifier les composants de la CEC. Les travaux réalisés sur le fractionnement granulométrique ont montré que la répartition de la MOS dans les différentes fractions granulométriques est influencée par le mode de gestion des parcelles (Djegui, 1992 ; Feller, 1993) et que certaines fractions contribuent de façon spécifique aux fonctions de réserve (N et P), aux fonctions d'échanges (CEC) et aux fonctions biologiques (immobilisation-minéralisation de C et N) du sol (Feller, 1995).

4.2. Matériel et Méthodes

4.2.1. Dispositifs servant de support aux fractionnements

Les huit échantillons de sols fractionnés proviennent de trois essais comparant des parcelles ayant reçu des apports de fumier ou compost à des témoins sans apports : deux essais, B1 et B4, sont implantés sur la station de Bébédjia au Tchad, et un essai, G, sur la station de Gagnoa en Côte d'Ivoire (tableau 24).

La station de Bébédjia est localisée dans le sud du Tchad dans le bassin cotonnier. Le climat est de type soudanien (alternance d'une saison sèche et d'une saison humide) avec une

Tableau 24 : origine des échantillons de sols étudiés.

Code	Essai	Application annuelle de matière organique	Durée de l'essai* (ans)
B1 - 0	B1	0 t ha ⁻¹	1
B1 - M	Bébédjia (Tchad)	fumier - 8 t MS ha ⁻¹	
B4 - 0	B4	0 t ha ⁻¹	4
B4 - M	Bébédjia	fumier - 10 t MS ha ⁻¹	
G11 - 0	G	0 t ha ⁻¹	11
G11 - M	Gagnoa (Côte d'Ivoire)	compost - 10 t MS ha ⁻¹	
G22 - 0	G	0 t ha ⁻¹	22
G22 - M	Gagnoa	compost - 10 t MS ha ⁻¹	

*Durée de l'essai : nombre d'années entre le début de l'essai et le prélèvement de sol effectué pour la présente étude.

pluviosité moyenne annuelle de 1000 mm. Les sols des essais appartiennent à la classe des Alfisols (Haplustalfs), développés sur matériaux sédimentaires sablo-argileux du Continental Terminal.

La station de Gagnoa est située dans la région centre-sud de la Côte d'Ivoire en zone forestière. Le climat est de type tropical humide (une saison sèche de quatre mois suivie par une période humide à répartition bimodale des précipitations permettant la réalisation de deux cycles de culture par an) avec une pluviosité annuelle moyenne de 1500 mm. Le sol de l'essai appartient à la classe des Alfisols (Udalfs), développés sur altérite de roche granitoïde. Les caractéristiques physico-chimiques initiales des sols des essais figurent au tableau 25.

Les prélèvements de sol sont réalisés sur l'essai B1 après 1 année d'application des apports organiques, sur l'essai B4 après 4 années d'application des traitements, et sur l'essai G après 11 (G11) et 22 (G22) années, chaque année comprenant une application des amendements et deux cycles de culture (tableau 24). Les prélèvements de sols sont effectués sur une profondeur de 0 à 20 cm en fin de saison sèche au Tchad (avril/mai) et pendant la seconde saison sèche en Côte d'Ivoire (janvier/février). Une rotation biennale coton-maïs est mise en place sur B1 et B4. Sur G, la culture de premier cycle est systématiquement un maïs. Du soja, niébé, arachide ou maïs sont cultivés en second cycle. Pour chacun des huit cas étudiés (B1, B4, G11 et G22 avec et sans apport organique), deux échantillons composés à partir des répétitions des essais constituent les

Tableau 25 : caractéristiques physico-chimiques initiales de surface (0-20 cm) des sols des essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).

	Bébédjia (Tchad)		Gagnoa (Côte d'Ivoire)
	B1	B4	G
Granulométrie			
Argile (g kg ⁻¹)	75	49	260
Limon fin (g kg ⁻¹)	29	46	40
Limon grossier (g kg ⁻¹)	40	43	40
Sable fin (g kg ⁻¹)	224	190	300
Sable grossier (g kg ⁻¹)	632	672	350
Total C (g kg ⁻¹)	6,0	2,6	10,8
Total N (g kg ⁻¹)	0,54	0,26	1,07
P assimilable (Olsen) (mg kg ⁻¹)	105	19	n.d.
Ca échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	3,6	1,0	3,2
Mg échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	0,51	0,18	0,53
K échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	0,20	0,08	0,14
Na échangeable (cmol _c kg ⁻¹)	0,03	0,03	0,02
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	4,3	1,4	5,8
pH eau	6,7	5,4	5,5

B1 : moyenne des analyses de sol des parcelles témoins après 1 an de culture,

B4 et G : analyses de sols avant implantation de l'essai,

CEC et cations échangeables : méthode au chlorure de cobaltihexamine.

n.d. = donnée manquante.

répétitions de terrain qui sont chacune analysée en deux répétitions de laboratoire.

4.2.2. Fractionnements granulométriques

Le fractionnement granulométrique du sol est réalisé selon la méthode décrite par Gavinelli *et al.* (1995). Il consiste en un tri granulométrique sans destruction de la MOS. Afin de désagréger le sol, celui-ci est mis en agitation dans l'eau à 50 rotations par minute pendant 2 heures avec 0,5 g d'hexamétaphosphate de sodium et cinq billes. Pour diminuer le risque de division de débris végétaux, seules les fractions inférieures à 50 μm sont passées aux ultrasons pendant dix minutes (Feller *et al.*, 1991). Le tri s'opère par tamisage humide (fractions supérieures à 20 μm) et décantation et siphonage en utilisant le principe de la loi de Stokes (fractions inférieures à 20 μm).

Les cinq fractions organo-minérales obtenues sont : la fraction "argile" (<2 μm), la fraction "limon fin" (2-20 μm), la fraction "limon grossier" (20-50 μm), la fraction "sable fin" (50-200 μm) et la fraction "sable grossier" (200-2000 μm). Le C soluble est mesuré (C hydrosoluble) pour vérifier la loi d'addition de la matière organique des fractions.

4.2.3. Déterminations des teneurs en C et de la CEC

Les dosages du C des sols non fractionnés et des cinq fractions sont réalisés après broyage fin par combustion sèche et détection catharométrique. Le dosage du C soluble est effectué par oxydation à haute température et détection aux infrarouges. Seules les moyennes des masses et teneur en C des quatre répétitions (deux de terrain et deux de laboratoire) sont présentées.

La CEC est mesurée en utilisant comme réactif d'échange le chlorure de cobaltihexammine et par quantification des cations cobalt échangés (Fallavier *et al.*, 1985). La mesure de la CEC des fractions et du sol non fractionné est réalisée sur des échantillons moyens constitués à partir de masses égales des quatre répétitions parce que les quantités de fractions "argile" et "limon fin" sont trop faibles pour une mesure séparée. Les quantités étant encore trop faibles pour le cas de l'essai B1, les deux fractions "argile" et "limons fin" ont été réunies.

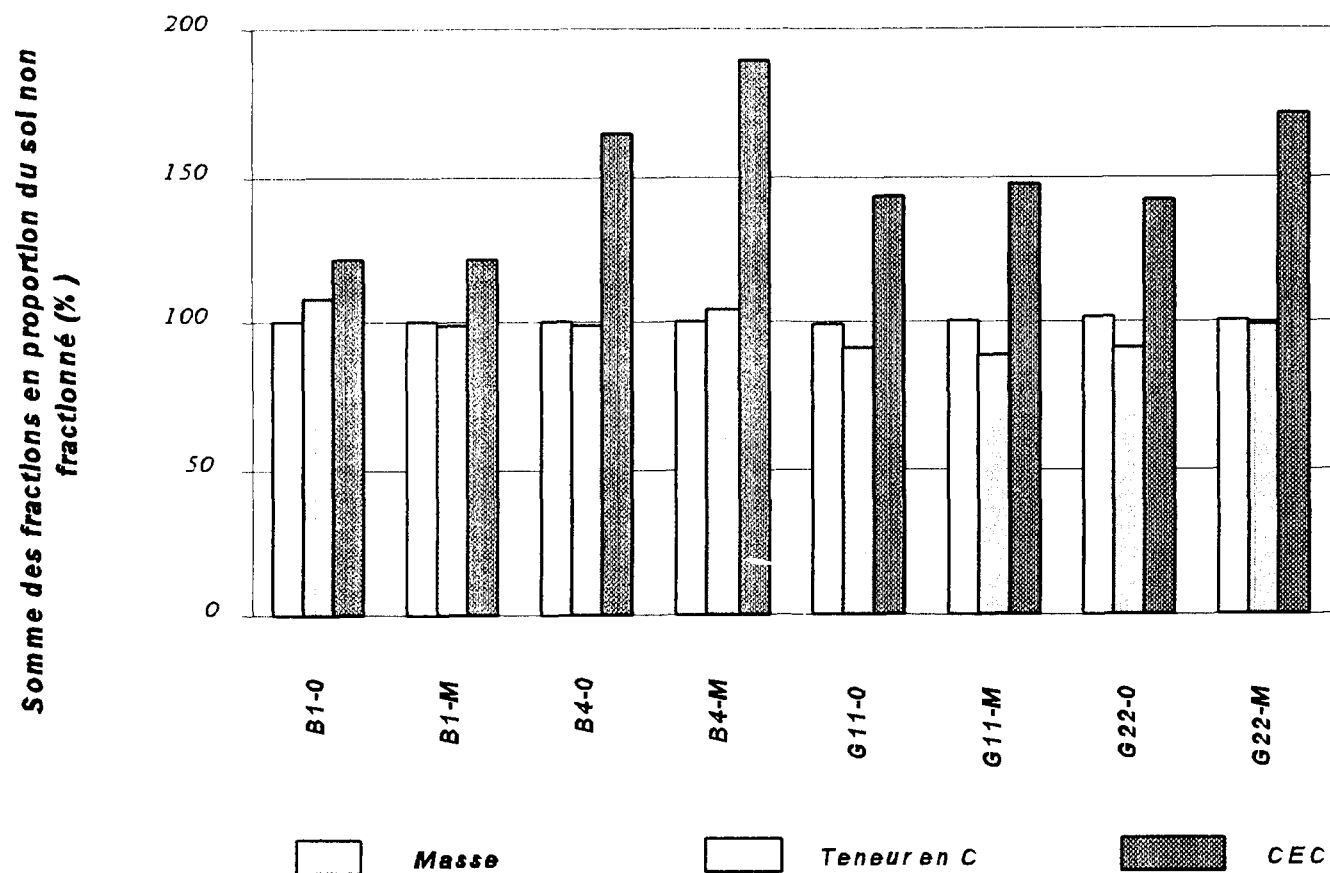


Figure 22 : somme des masses, teneur en C et capacité d'échange cationique des fractions exprimées en proportion de la masse, teneur en C et capacité d'échange cationique du sol non fractionné, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire): voir tableau 24 pour les codes des échantillons de sol.

4.3. Résultats et discussions

4.3.1. Vérifications de la règle d'additivité

Si Y est la valeur d'une caractéristique du sol non fractionné et qui n'est pas altérée par le fractionnement, on peut vérifier que :

$$\sum_i y_i = Y \quad \text{avec } y_i = \text{valeur de la caractéristique Y pour la fraction i. L'écart entre la somme des}$$

caractéristiques des fractions et la caractéristique du sol non fractionné est alors un indicateur de la précision avec laquelle ont été réalisés le fractionnement et les mesures.

Cette vérification est faite pour la masse, le contenu en C et la mesure de la CEC (figure 22). Le fractionnement permet de récupérer entre 98,6 et 100,8% de la masse et entre 88 et 104% du C du sol non fractionné, compte tenu du C soluble. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par ailleurs (Feller, 1995 ; Harmand, 1998 ; Kouakoua, 1998). La difficulté de mesurer les très faibles teneurs en C des fractions "sables grossier" et "sable fin" est probablement à l'origine des écarts plus importants constatés pour cette caractéristique.

Tableau 26 : somme de la capacité d'échange cationique (CEC) des fractions en % de la CEC du sol non fractionné avec deux méthodes de détermination de la CEC, essais de Bébédjia (Tchad) et Gagnoa (Côte d'Ivoire).

Code*	CEC mesurée par la méthode au chlorure de cobaltihexamine	CEC calculée pour la méthode à l'acétate d'ammonium**
B1 - 0	121%	121%
B1 - M	122%	155%
B4 - 0	164%	187%
B4 - M	190%	164%
G11 - 0	142%	129%
G11 - M	146%	112%
G22 - 0	141%	137%
G22 - M	171%	184%

*Voir tableau 24.

** En utilisant les équations établies par Ciesielski et Sterkeman (1997).

La règle de l'additivité n'est par contre pas vérifiée pour la CEC : la somme des CEC des fractions est systématiquement supérieure à la CEC du sol non fractionné dans des proportions allant de 121 à 190%. Le fractionnement a donc altéré cette caractéristique de sol. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer cette différence :

- la désagrégation des sols, étape préliminaire au fractionnement, a libéré des sites occultés par les associations entre argiles et MOS. Des constatations identiques sont réalisées lors de mesures de la CEC de sols après oxydation de la MOS par H_2O_2 (Calcinai et Sequi, 1976). Feller (1995) constate cependant qu'une méthode de désagrégation basée sur l'emploi des ultrasons et de résines sodiques n'augmente pas les surfaces spécifiques des minéraux. La méthode est cependant peu précise dans le cas d'Alfisols où ces surfaces spécifiques sont faibles, et dans l'hypothèse où la surface spécifique n'est pas modifiée par le traitement, il est possible que la densité de charge ait pu être modifiée,

- l'hexaméthaphosphate utilisé pour la désagrégation du sol peut jouer un rôle identique à celui des ions phosphates simples, bien qu'aucune étude à notre connaissance ne l'ait établi. Les

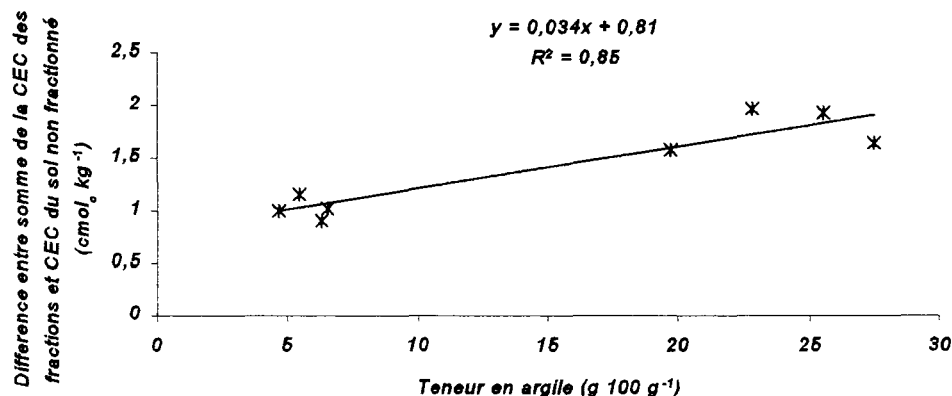


Figure 23 : différence entre la somme de la capacité d'échange cationique des fractions et la capacité d'échange cationique du sol non fractionné en fonction de la teneur en argile pour huit échantillons de sol des essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).

ions phosphates augmentent la CEC en occultant des charges positives sur les hydroxydes métalliques, abaissant ainsi le point de charge nulle (ZPC) du sol et augmentant la CEC (Schalscha *et al.*, 1972 ; Gillman et Fox, 1980 ; Uehara et Gillman, 1981 ; Hailé, 1982).

Une modification du pH au cours du fractionnement ne peut être à l'origine de cet écart. Les différences de pH relevées entre les fractions et le sol non fractionnés sont faibles et un réajustement effectué à partir des équations établies par Ciesielski et Sterckman (1997) indique que l'écart aurait été de même importance si la mesure de la CEC avait été réalisée par la méthode à l'acétate d'ammonium (tableau 26).

Le fractionnement du sol a provoqué une augmentation de la CEC. Cette augmentation apparaît corrélée au taux d'argile du sol (figure 23). L'hypothèse d'une libération de sites consécutive à la dispersion du sol s'accorde avec cette relation, obtenue cependant avec un faible nombre d'observations.

4.3.2. Caractéristiques des fractions

Les échantillons de sol étudiés présentent une granulométrie dominée par les fractions "sable grossier" et "sable fins" (tableau 27). Les teneurs en C des fractions croissent en fonction

Tableau 27 : masse des fractions en pourcentage de la masse du sol non fractionné, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).

Essai et traitement*		Pourcentage de la masse du sol non fractionné				
		Sable grossier	Sable fin	Limon grossier	Limon fin	Argile
B1	0	69,8	16,0	3,3	4,7	6,0
	M	72,3	12,9	3,1	5,0	7,0
B4	0	73	13,8	3,0	4,5	5,0
	M	74,6	13,4	3,0	4,3	5,0
G11	0	39,4	22,1	3,3	6,6	27,0
	M	43,1	20,6	3,0	7,4	26,0
G22	0	49,8	17,8	2,8	7,5	23,0
	M	54,5	16,0	2,7	6,5	20,0

*voir tableau 24.

inverse de leur taille avec des valeurs très faibles pour la fraction “sable grossier” (moins de 1 g kg⁻¹) et des valeurs de 15 à 40 g kg⁻¹ pour la fraction “argile” (tableau 28). Près de la moitié de la MOS est donc de taille inférieure à 2 µm et entre 15 et 30% entre 2 et 20 µm. Cette prédominance des MO fines est couramment observée pour les sols tropicaux, quelle que soit l'importance de la fraction “argile” (Quiroga *et al.*, 1996 ; Feller et Beare, 1997).

Si globalement les huit échantillons de sol présentent des caractéristiques semblables, quelques différences entre les deux sites peuvent être signalées : les sols de l'essai de Gagnoa (Côte d'Ivoire) sont plus argileux que ceux de l'essai de Bébédjia (Tchad), mais la teneur en C des

Tableau 28 : teneur en C des fractions, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).

Essai et traitement*		Teneur en C (g kg ⁻¹)				
		Sable grossier	Sable fin	Limon grossier	Limon fin	Argile
B1	0	0,6	2,5	7,8	37	40
	M	1,0	4,2	9,4	43	38
B4	0	0,2	1,1	4,2	17	26
	M	0,4	2	4,9	15	31
G11	0	1,2	2,2	10,7	19	16
	M	1,9	4,1	14,4	24	19
G22	0	1,4	2,4	9,7	16	15
	M	2,0	5,1	15,5	22	19

*Voir tableau 24.

Tableau 29 : effet des apports de matière organique sur la capacité d'échange cationique des fractions et du sol non fractionné, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).

Essai et traitement*	CEC des fractions (cmol _c kg ⁻¹)						CEC déterminée pour le sol non fractionné (cmol _c kg ⁻¹)
	Sable grossier	Sable fin	Limon grossier	Limon fin	Argile	Limon fin + argile	
B1	0	0,2	0,6	1,3	n.d.	n.d.	40,4
	M	0,2	1,1	2,5	n.d.	n.d.	45,1
B4	0	0,2	0,4	0,6	8,8	34,0	n.d.
	M	0,3	0,6	1,2	8,2	40,0	n.d.
G11	0	0,3	0,7	1,3	3,9	16,6	n.d.
	M	0,4	1,0	1,9	4,8	22,2	n.d.
G22	0	0,4	0,5	1,1	4,1	18,1	n.d.
	M	0,7	1,0	2,3	6,3	22,5	n.d.

*Voir tableau 24.

n.d. : donnée manquant

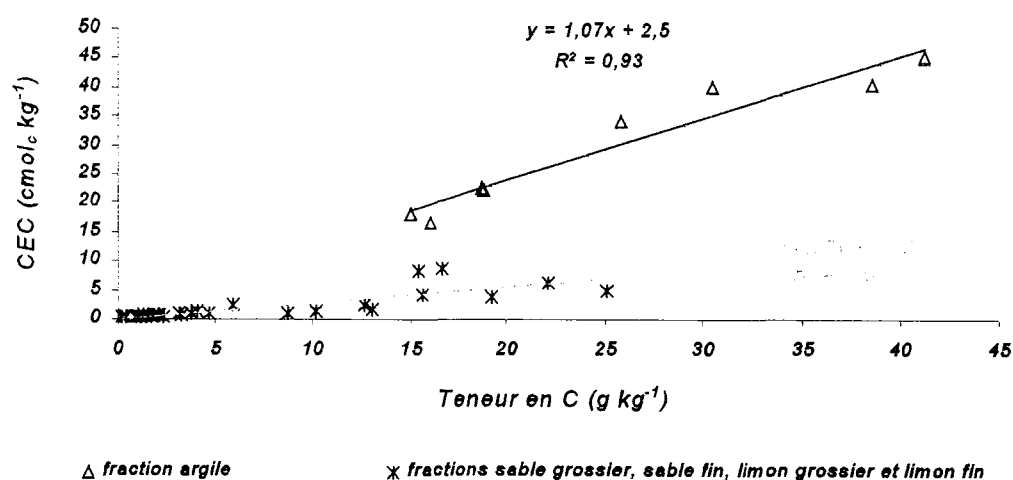


Figure 24 : capacité d'échange cationique des fractions en fonction de leur teneur en C.

fractions “argile” est plus faible (tableau 28). Au final, les répartitions de la MOS entre les différentes fractions sont semblables pour les deux sites (tableau ?).

4.3.3. CEC des fractions

Le tableau 29 contient les résultats des mesures de CEC des différentes fractions. On constate que la CEC croît en relation inverse de la taille des fractions. Les fractions des sols ayant reçu des apports organiques ont toujours une CEC supérieure à celle des témoins sauf pour la fraction “sable fin” de l’essai B4. La part de la fraction “argile” dans l’expression de la CEC totale est prépondérante (tableau 30). Les travaux de Boissezon *et al.* (1991), Oliver et Letourmy (1992), Feller (1995) et Saviozzi *et al.* (1997) aboutissent également à ce résultat par des approches différentes.

La CEC des fractions est fonction de leur teneur en C comme le montre la figure 24 qui cependant fait apparaître deux catégories de fractions :

- les fractions “sable grossier”, “sable fin”, “limon grossier” et “limon fin” pour lesquelles l’équation de régression passe pratiquement par l’origine. Ceci signifie que la CEC provenant des minéraux de ces fractions est quasi-nulle. Le coefficient directeur de la droite de régression indique que la CEC d’origine organique par unité de C de ces fractions est d’environ $270 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1} \text{ C}$,
- les fractions “argile” (et “argile” + “limon fin” pour les échantillons de l’essai B4) pour lesquelles l’équation de régression prend la valeur $2,5 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ à l’origine qui représenterait la CEC minérale. Cette valeur correspond aux valeurs attribuées à la kaolinite pure, généralement de 2 à $5 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1}$ (Sanchez, 1976 ; Greenland et Mott, 1978). Le coefficient directeur de la droite de régression est plus important, indiquant que la CEC d’origine organique par unité de C est pour ces fractions d’environ $1000 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1} \text{ C}$. Leinweber *et al.* (1993) mentionnent pour des sols sous climat tempéré une valeur moins élevée pour les fractions “argile” ($560 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1} \text{ C}$) identique à celle des autres fractions. Des variations dans la composition des fractions fines et des séparations plus ou moins complètes peuvent expliquer ces résultats divergents. Feller (1995) indique que la matière organique des fractions “argile” est constituée essentiellement d’acides humiques et fulviques. Burns (1986) attribue aux acides humiques et fulviques des valeurs respectivement entre 300 et 500 et entre 500 et $750 \text{ cmol}_e \text{ kg}^{-1} \text{ C}$. En tenant compte du fait que la CEC après fractionnement est de 50%environ supérieure à la CEC du sol non fractionné, les

Tableau 30 : effet des apports organiques sur la contribution des fractions à la capacité d'échange cationique du sol non fractionné, essais de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire).

Essai et traitement*		Contribution des fractions à la CEC du sol non fractionné (%)					
		Sable grossier	Sable fin	Limon grossier	Limon fin	Argile	Limon fin + argile
B1	0	3,0	2,1	0,8	n.d.	n.d.	94,1
	M	2,4	3,0	1,3	n.d.	n.d.	93,3
B4	0	6,3	2,1	0,7	15,2	75,7	n.d.
	M	9,8	3,0	1,4	13,7	72,2	n.d.
G11	0	2,5	3,0	0,6	5,6	88,3	n.d.
	M	2,9	3,3	0,7	5,5	87,7	n.d.
G22	0	4,5	1,9	0,6	6,4	86,7	n.d.
	M	6,8	3,1	1,2	7,5	81,5	n.d.

*Voir tableau 24.

Somme de la CEC des fractions égale 100%.

n.d. = donnée manquante.

résultats exposés ici sont du même ordre de grandeur que ceux reportés par Burns.

Il n'apparaît pas de différences en ce qui concerne la CEC d'origine organique par unité de C des fractions entre les parcelles avec et sans apports organiques (figure 25) suggérant que le C des fractions possède la même réactivité vis à vis des propriétés d'échange dans les deux cas. Les apports organiques occasionnent une augmentation de la CEC du sol par le biais de l'augmentation du C du sol qu'ils engendrent, et notamment parce que cette augmentation touche également les fractions fines de MOS.

4.3.4. Conclusion

La fraction "argile" contribue de façon prépondérante à la CEC des Alfisols. La MOS de la taille des argiles prédomine dans ce type de sol et a une activité d'échange importante. Les techniques culturales propres à maintenir la MOS de cette fraction seront les plus efficaces dans

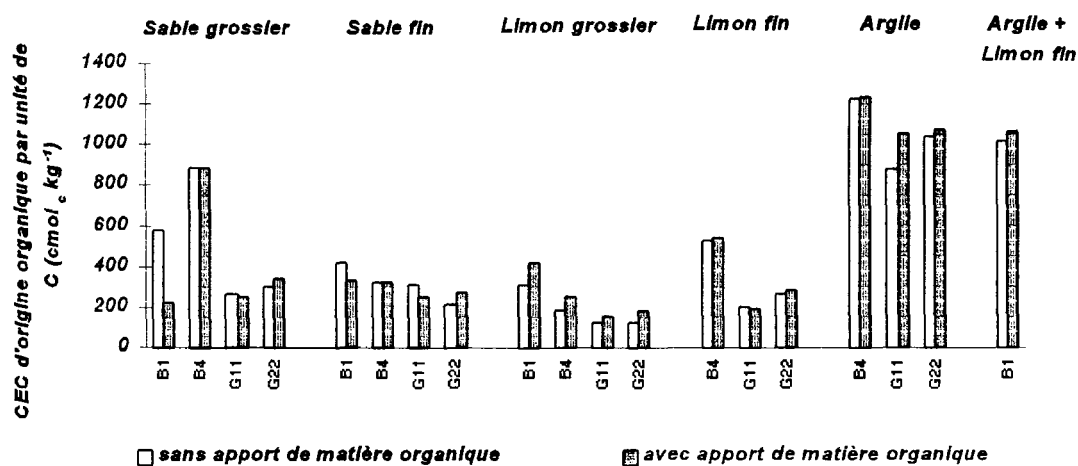


Figure 25 : effet des apports de matière organique sur la capacité d'échange cationique d'origine organique par unité de C des fractions, essai de Bébédjia (Tchad) et de Gagnoa (Côte d'Ivoire). Voir tableau 24 pour le code des échantillons de sol.

le maintien de la CEC de ces sols. C'est en partie parce que la plupart des conduites culturales modifiant le stock de C concernent d'abord les fractions grossières de MOS (Djégui, 1992 ; Bacyé, 1993 ; Feller, 1993.) que l'impact sur la CEC des sols est moins important que la modification de C du sol. Les apports organiques compostés, avec un impact certain sur le contenu en C de la fraction "argile", contribuent efficacement au maintien de la CEC des sols.

Conclusions et perspectives

CONCLUSIONS

Les systèmes de culture pratiqués dans le bassin cotonnier du Tchad sont caractérisés par l'absence de restitution organique, le faible recours aux engrais minéraux et l'abandon progressif des jachères du fait d'une pression foncière croissant au même rythme que la démographie. Cette situation est fréquente dans la zone semi-aride de l'Afrique. Dans les villages où les terroirs sont saturés, de faibles productions sont enregistrées, pouvant refléter une baisse de la fertilité des sols résultante de ces pratiques. Pour confirmer cette hypothèse, un diagnostic agronomique a été conduit en 1994 dans six villages de cette région caractérisés par des situations foncières contrastées. Cette étude a mis en évidence que le potentiel de production de ces sols diminue rapidement dès lors que des caractéristiques physico-chimiques de sols ont une valeur située en dessous d'un seuil. Un seuil de teneur en MOS a ainsi été mis en évidence ($3,4 \text{ g kg}^{-1}$ pour la teneur en C ; $0,31 \text{ g kg}^{-1}$ pour la teneur en N), qui est en relation étroite avec un seuil de niveau de CEC du sol ($2,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). La valeur de ces seuils rend plausible l'hypothèse que ces caractéristiques de sol sont limitantes, au contraire de l'acidité, des teneurs en Ca et Mg échangeables dont les seuils ne correspondent pas à des niveaux préjudiciables aux cultures et des teneurs en P et K qui ne font pas apparaître de valeurs seuils. Le niveau de MOS est un indicateur de fertilité des sols de la région, et constitue un facteur limitant, mais on ne peut déterminer la ou les propriétés de sol régies par la MOS en cause dans la limitation de la production. Les sols présentant de telles caractéristiques en dessous des valeurs seuils sont majoritairement localisés dans les villages connaissant une saturation de leur terroir cultivé. L'hypothèse que les différents états de fertilité des sols décrits dans le diagnostic résultent du processus anthropique de mise en culture de ces sols est confirmée. De nombreuses caractéristiques physico-chimiques des sol (teneurs en C, N, argile, bases échangeables, niveau de CEC, pH) peuvent servir d'indicateur de fertilité des sols. Mais tous ne renseignent pas sur les processus en cause dans l'évolution de la fertilité des sols. L'interprétation de tels diagnostics doit s'effectuer en référence à des résultats d'expérimentations agronomiques en raison de confusions d'effets possibles.

Des observations sur expérimentations à long terme et des simulations de la cinétique d'évolution des teneurs en MOS par le modèle de Hénin-Dupuis ont été réalisées au Tchad et Côte d'Ivoire. Ils confirment que les variations de teneur en MOS sous culture peuvent être de même amplitude que les variations spatiales de teneurs en MOS constatées dans le bassin cotonnier du Tchad. L'hypothèse selon laquelle des niveaux de MOS observés lors du diagnostic sont la résultante

des mises en culture est vraisemblable. Les niveaux d'équilibre de MOS sous culture continue sans apports organiques se situent en dessous des seuils déterminés et légèrement au-dessus avec apports annuels importants (8 à 10 t MS ha⁻¹ an⁻¹). Les amendements organiques empêchent la teneur en MOS de descendre en dessous des seuils provoquant une chute des productions, mais avec des niveaux de d'apports qui sont incompatibles avec les possibilités techniques actuelles des exploitations de la région. Les apports de fumier ou de compost se traduisent par des augmentations de rendement immédiates en interaction négative avec l'apport d'engrais azoté ce qui s'expliquerait par leur effet prédominant sur la fourniture d'azote aux cultures. Mais d'autres effets des apports de MOS sur les propriétés du sol peuvent coexister étant occultés par cette fonction prédominante .

La MOS est constituée d'éléments très hétérogènes du point de vue de leur composition chimique, de leur taille ou de leur durée de vie dans le sol et toute la MOS ne contribue pas forcément de façon identique aux différentes propriétés de sol sous son influence. Maintenir un taux global de MOS au-dessus d'un certain seuil, nécessitant la mise en oeuvre de techniques culturales contraignantes, n'est pas justifié si les compartiments fonctionnels de la MOS ne sont pas concernés par ces modifications. Mesurer l'aptitude d'une technique culturale à maintenir une propriété de sol liée à la teneur en MOS nécessite de repérer les compartiments de MOS impliqués dans cette fonction et de mesurer l'impact de cette technique sur ces compartiments fonctionnels. Cette approche a été appliquée à l'étude de la CEC, propriété qui est dans ce type de sols sous l'influence de la MOS.

Il a été montré que les MOS de taille inférieure à 2 µm, constituant la moitié de la MOS totale des sols étudiés, ont une activité d'échange quatre fois plus importante que les autres fractions de MOS du sol. La fraction organo-minérale du sol de la taille des argiles participe à hauteur de 80% à la CEC du sol du fait des activités d'échange des minéraux et de celle des MO de la taille correspondante.

Les MOS de taille inférieure à 2 µm sont plus stables que les autres fractions de MOS avec une demi-vie dix fois supérieure que les MOS associées à la fraction sableuse. Pour autant, leur niveau peut diminuer fortement au cours de la mise en culture des sols. Les apports de compost ou de fumier, s'ils augmentent plus nettement les fractions grossières de MOS, permettent également aux MOS de la taille des argiles de se maintenir à un niveau satisfaisant pour garantir des propriétés d'échange correctes du sol. Les apports organiques sont donc capables d'influer sur des compartiments de la MOS contribuant dans une large mesure à la CEC du sol.

Il reste à identifier des techniques de fabrication d'amendements organiques permettant l'obtention de produits ayant une meilleure efficacité sur les fractions fines de la MOS.

PERSPECTIVES

Le fractionnement granulométrique des sols sans destruction de la MO permet d'isoler des compartiments de MOS spécifiques par les propriétés qu'elles confèrent au sol, par leur cinétique. L'importance de ces fractions de MOS dans le sol dépend des techniques culturales appliquées. Cette méthode permet d'améliorer les connaissances sur l'évolution des sols sous culture et sur les constituants des sols à l'origine des principales fonctions que le sol doit assurer dans le processus de production. Mais elle a également un intérêt opérationnel par la détermination de pratiques culturales susceptibles d'influer sur le niveau de compartiments fonctionnels du sol. La présente étude a pu montrer que les fractions fines de MOS (inférieures à 2 microns) contribuent spécifiquement à la CEC des sols tropicaux et sont plus stables que les autres fractions. Les amendements organiques tels que fumier et compost sont capables d'entretenir le niveau de ce compartiment de MOS dans le sol, bien qu'ils augmentent plus nettement les fractions grossières de MOS. Les perspectives offertes par cette méthode sont nombreuses mais nécessitent des mises au point méthodologiques.

- Mises au point méthodologiques

L'étude de la fonctionnalité des différents compartiments de MOS isolés n'est possible que si la méthode de fractionnement n'altère pas la propriété étudiée. La phase de désagrégation du sol du fractionnement par des agents chimiques ou physiques peut provoquer des altérations de certaines propriétés du sol. La somme de la CEC des fractions est toujours supérieure à la CEC du sol de départ. L'hypothèse expliquant cette anomalie est que la désagrégation du sol libère des sites actifs d'échange de cations occultés dans le sol normalement agrégé. Il convient cependant de confirmer cette hypothèse en s'assurant que les agents chimiques utilisés pendant la phase de désagrégation ne sont pas responsables de cette altération.

D'une façon générale, l'étude des propriétés chimiques du sol par le biais des fractions nécessite qu'aucun agent chimique ne soit utilisé dans les différentes manipulations. Les horizons de surface des sols tropicaux cultivés présentent des structures à faible cohésion et des méthodes de désagrégation moins agressives devraient être testées. Le recours à des dispersants chimiques

n'est peut être pas indispensable, ce qui permettrait d'étudier la spécificité des fractions de MOS dans la mise à disposition des cations basiques (K, Ca, Mg) et du phosphore sous des formes facilement utilisables pour les cultures. Enfin, il serait utile de normaliser le nombre et les classes de taille des fractions qu'il est nécessaire d'obtenir afin de pouvoir mieux comparer les différents résultats des études ayant pour objet cette méthode.

- Recherche de compartiments fonctionnels pour les différentes propriétés de sols influencées par la MOS

Parmi les fonctions du sol dépendant de la MOS, il a été montré que la fourniture en azote aux plantes pouvait être un facteur limitant de la capacité des sols à produire pour la zone cotonnière du Tchad. Cette fonction du sol, liée à la minéralisation de la MOS peut dépendre d'autres compartiments de la MOS que ceux responsables des propriétés d'échange. En effet, il a été montré que les fractions grossières de MOS sont plus labiles, donc sont susceptibles de fournir de l'azote minéral. Mais les fractions fines, avec un C/N faible peuvent également participer à cette fonction du sol. L'approche granulométrique peut permettre de déterminer quels compartiments de MOS sont fournisseurs de l'azote minérale et de localiser la fraction "azote facilement minéralisable" mis en évidence par Stanford et Smith (1972). L'intérêt d'isoler cette fraction réside dans l'obtention d'un indicateur de fourniture d'azote par le sol aux plantes, permettant ainsi de mieux piloter cette fonction du sol par des techniques culturales adaptées.

- Modélisation de la cinétique des différentes fractions de MOS

La présente étude met en avant le fait que les fractions fines de MOS peuvent diminuer fortement sous certaines conditions et ce malgré des coefficients de minéralisation assez faibles (k_2 de l'ordre de 4% pour les MOS de la taille des argiles contre 35% en ce qui concerne les MOS de la taille des sables). Ceci est dû au fait que les entrées annuelles dans ce compartiment de MOS sont également très faibles (k_1 du compost pour les fractions argileuses de la MOS de l'ordre de 3% contre 19% pour les fractions de MOS de la taille des sables). Ces résultats issus d'un seul essai sont évidemment à confirmer. La détermination des entrées et sorties des différents compartiments de MOS sont nécessaires pour modéliser les devenir des différents compartiments

de MOS.

- Amélioration de la qualité des amendements organiques produits et utilisés

Dans l'objectif d'un maintien des propriétés d'échange du sol, l'intérêt d'amendements organiques n'est pas de maintenir un taux global de MOS, mais d'agir le plus spécifiquement possible sur les fractions fines de la MOS. L'impact sur ce compartiment de MOS peut constituer une évaluation de la qualité et de l'efficacité des différentes gestions organiques qui sont communément proposées, telles que paillage, restitutions des résidus de cultures, agroforesterie ou plantes de couverture. Des procédés de fabrication en vue d'obtenir des amendements organiques plus efficaces sur l'impact du compartiment de MOS fines sont à rechercher, ce qui pourrait abaisser pour un même résultat les quantités d'amendements à fabriquer, transporter et épandre, rendant cette technique accessible à un plus grand nombre d'exploitation.

RÉFÉRENCES

AVERTISSEMENT

Pour faciliter l'utilisation des références, deux listes sont constituées. La première, références citées, inventorie les références citées dans le texte. La seconde, références bibliographiques, recense les références se rapportant aux sujets traités, mais qui n'ont pas été citées dans le texte.

RÉFÉRENCES CITÉES	120
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	129

Certaines références cataloguées ne sont pas accessibles de façon usuelle. Ce sont des rapports, documents de travail ou mémoires. Elles sont néanmoins listées en raison de l'intérêt qu'elles revêtent et de la non disponibilité de références classiques contenant les mêmes informations. Ces références concernent essentiellement deux champs d'investigation : des données de nature socio-économiques sur la région sud du Tchad, pour lesquelles peu de références classiques existent et des résultats d'expérimentations agronomiques sur les amendements organiques en milieu tropical, pour lesquels l'ensemble des références répertoriées ont été signalées.

RÉFÉRENCES CITÉES

- AFNOR 1987. Qualité des sols. Méthodes d'Analyse. Recueil de Normes Françaises. 135 p., Association Française de Normalisation, Paris.
- Arrouays D. et Pélissier P. 1994. Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant Soil*, **100**, 215-223.
- Aubert G. 1968. Classification des sols utilisée par les pédologues français. In : "World Soil Resources Report 32", pp. 78-84, FAO/UNESCO, Rome.
- Aubréville A. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale. 351 p., Société d'Editions Géographique, Maritimes et Coloniales, Paris.
- Ayabana A. et Jenkinson D. S. 1990. Decomposition of carbon-14 ryegrass and maize under tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**, 112-115.
- Bache B. W. et Heathcote R. G. 1969. Long-term effects of fertilizers and manure on soil and leaves of cotton in Nigeria. *Exp. Agr.*, **5**, 241-247.
- Bacqué B. 1993. Influence des systèmes de culture sur l'évolution du statut organique et minéral des sols ferrugineux et hydromorphes de la zone soudano-sahélienne (province du Yatenga, Burkina Faso). Thèse de Doctorat, 243 p., Université de Droit, d'Economie et des Sciences, Aix-Marseille.
- Bado B. V., Sédogo M. P., Cescas M. P., Lompo F. et Bationo A. 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 571-575.
- Balesdent J. 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et Gestion des sols*, **3**, 245-260.
- Balesdent J. 1997. La matière organique des sols : dynamique du carbone. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **83**, 99-110.
- Balesdent J., Mariotti A. et Guillet B. 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.*, **19**, 25-30.
- Beauvilain A. 1993. Tableau de la population du Tchad des années vingt à 1993. A. Beauvilain (éd.), 112 p., Centre National d'Appui à la Recherche, N'Djaména.
- Berger M. 1996. L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. *Agriculture et Développement*, n° hors série 1996/06, 1-58.
- Bergonzini J. C. 1986. Notes sur la comparaison AFC/ACP sur [0-1]. In : "Traitement statistique de tableaux constitués de 0 et de 1", Montpellier, 15-17 sept. 1986, Cirad, Montpellier.

- Boiffin J., Kéli Zagbahi J. et Sebillotte M. 1986. Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agronomie*, **6**, 437-446.
- Boissezon P., Bellier G., Brion J. C., Gavinelli E. et Fardoux J. 1991. Capacité d'échange cationique provenant de l'enfouissement de paille de luzerne dans le sol. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, **26**, 263-280.
- Bonde T. A., Christensen B. T. et Cerri C. C. 1992. Dynamics of soil organic matter as reflected by natural ¹³C abundance in particle size fractions of forested and cultivated oxisols. *Soil Biol. Biochem.*, **24**, 275-277.
- Brams E. A. 1971. Continuous cultivation of West African soils: organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant Soil*, **35**, 401-414.
- Burns R. G. 1986. Interactions of enzymes with soil mineral and organic colloids. In : "Interactions of soil minerals with natural organics and microbes", P. M. Huang et M. Schnitzer (éds.), pp. 429-451, Soil Science Society of America, Madison.
- Calcinai M. et Sequi P. 1977. Contribution of organic matter to cation-exchange capacity of soils. In : "Soil organic matter studies", vol. 1, pp. 63-67, FAO, IAEA, Vienna.
- Chabalier P. F. 1986. Evolution de la fertilité d'un sol ferrallitique sous culture continue de maïs en zone forestière tropicale. *Agron. Trop.*, **41**, 179-191.
- 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 économiques. *Agron. Trop.*, **26**, 209-255.
- Ciesielski H. et Sterckman T. 1997. A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. *Agronomie*, **17**, 9-16.
- Cisse L. 1985. Etude des effets des apports de matières organiques sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal. Thèse de Doctorat, 184 p., INPL, Nancy.
- Cisse L. 1988. Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord Sénégal. II. Développement des plantes et mobilisations minérales. *Agronomie*, **8**, 411-417.
- Cisse L. et Vachaud G. 1988. Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux dégradé du Nord-Sénégal. I. Bilans de consommation, production et développement racinaire. *Agronomie*, **8**, 315-326.
- Crétenet M. 1995. Conception des systèmes de culture durables. Expérimentation et enquête dans l'étude de la fertilité des sols. In : "Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions", F. Ganry et B. Campbell (éds.), pp. 131-139, Cirad, Montpellier.

- Debaeke P., Doré T. et Vaux P. 1996. Production de références sur les successions de culture. *In* : "Expérimenter sur les conduites des cultures", DERF et ACTA (éds.), pp. 87-98, Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation, Paris.
- Djégui N. 1992. Influence des systèmes de cultures sur le statut organique (particulièrement sur la dynamique de l'azote) des sols sur terres de barre du Sud-Bénin. Thèse de Doctorat, 191 p., INPT, Toulouse.
- Djoulet B. 1990. Rapport annuel 1988-1989, Agronomie, station de Bébédjia, 89 p., Irct-Cirad, Paris.
- Ehrwein J. H. 1976. Esquisse de reconnaissance des vocations des sols, échelle 1/100000, Tchad au Sud du 16e parallèle. Ministère de l'Agriculture, section Agropédologie, N'Djaména.
- Fallavier P. 1995. Physico-chimie des sols tropicaux. *In* : "Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides", J. Pichot, N. Sibelet et J. J. Lacoëuilhe (éds.), pp. 23-39, Cirad, Montpellier.
- Fallavier P., Babre D. et Breysse M. 1985. Détermination de la capacité d'échange cationique des sols tropicaux acides. *Agron. Trop.*, **40**, 298-308.
- Feller C. 1993. Organic inputs, soil organic matter and functional soil organic compartments in low-activity clay soils in tropical zones. *In* : "Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture", K. Mulongoy et R. Merckx (éds.), pp. 77-88, Wiley-Sayce, Chichester.
- Feller C. 1995 a. La matière organique des sols, facteur de durabilité : recherche d'indicateurs de qualité des terres. *In* : "Sustainable land management in African semi-arid and subhumid régions", F. Ganry et B. Campbell (éds.), Ministère de la Coopération, Unep, Cirad-ca, Montpellier.
- Feller C. 1995 b. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1 : recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. 2 vol., 393 et 236 p., ORSTOM éditions, Paris.
- Feller C. 1997. La matière organique des sols : aspects historiques et état des conceptions actuelles. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **83**, 85-98.
- Feller C. et Beare M. H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, **79**, 69-116.
- Feller C., Bernhardt-Reversat F., Garcia J. L., Pantier J. J., Roussos S. et Van Lliet-Lanoe B. 1983. Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques d'un sol sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost). *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, **20**, 223-238.

- Feller C., Burtin G., Gérard B. et Balesdent J. 1991. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêt et limites. *Sci. Sol*, **29**, 77-93.
- Fleury A. 1990. Methodologie de l'analyse de l'élaboration du rendement. *In* : "La vie du maïs, physiologie du maïs, application à la production dans physiologie et production du maïs", D. Picard (éd.), pp. 279-289, INRA, AGPM, Université de Paris-Sud, Paris.
- Forest F. et Clopes A. 1994. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. *In* : "Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par le système de culture. Colloques et Congrès. Science et Changements Planétaires/Sécheresse", F. N. Reyniers et L. Netoyo (éds.), pp. 3-15, John Libbey Eurotext, Paris.
- Forest F. et Lidon B. 1984. Influence du régime pluviométrique sur la fluctuation du rendement d'une culture de sorgho intensifiée. *In* : "Agrometeorology of sorghum and millet in semi-arid tropics", Patancheru, 15-20 novembre 1982, pp. 247-260, ICRISAT, Patancheru.
- Franquin P. et Forest F. 1977. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, **32**, 7-11.
- Gachon L. e., 1988. Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation. 566. INRA, Paris.
- Ganry F. 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de Doctorat d'Etat, 335 p., Université de Nancy I, Nancy.
- Ganry F. 1991. Rôle de la fixation de N₂ dans l'amélioration durable de la fertilité azotée d'un sol sableux tropical par l'amendement calcique et organique. *In* : "Fixation biologique de l'azote et stabilité de l'Agriculture Tropicale", K. Mulongoy (éd.), John Wiley & Sons, Chichester.
- Gavinelli E., Feller C., Larre-Larrouy M. C., Bacyé B., Djégui N. et Nzilla J. d. 1995. A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples for tropical soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **26**, 1749-1760.
- Gigou J. et Kouassi-Bredoumy S. T. A paraître. Twenty years of continuous maize cultivation in the forest zone of Cote D'Ivoire. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*.
- Gillman G. P. et Fox R. L. 1980. Increases in the cation exchange capacity of variable charge soils following superphosphate applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 934-938.
- Gokhale N. G. 1959. Soil nitrogen status under continuous cropping and with manuring in the case of unshaded tea. *Soil Sci.*, 331-333.

- Greenland D. J. et Mott C. J. B. 1978. Surfaces of soil particle. *In* : "The chemistry of soil constituents", D. J. Greenland et M. H. B. Hayes (éds.), pp. 321-353, John Wiley & Sons, Chichester.
- Greenland D. J., Wild A. et Adams D. 1992. Organic Matter dynamics in Soils of the Tropics - From Myth to Complex Reality. *In* : "Myths and Science of Soils of the Tropics", R. Lal et P. A. Sanchez (éds.), pp. 17-33, Soil Science Society of America Inc, Madison.
- Guibert H. 1993. Suivi de la force de travail 1988-1989 en zone cotonnière du Tchad. *Rev. Sci. Tchad*, 111-124.
- Guibert H. et Ngamine J. 1996. Gérer les ressources naturelles du terroir avec les villageois. 1 p., Cirad, Paris.
- Hailé A. 1982. Etude de l'effet d'amendements minéraux sur la réduction des pertes minérales par lixiviation dans quelques sols dominés par des colloïdes à charge variable. 131 p., Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- Harmand J. M. 1998. Rôle des espèces ligneuses à croissance rapide dans le fonctionnement biogéochimique de la jachère. Effet sur la restauration de la fertilité des sols ferrugineux tropicaux. (Bassin de la Bénoué au Nord-Cameroun). 2 vol., 213 et 55 p., Cirad-Forêt, Paris.
- Hassink J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil*, **191**, 77-87.
- Hénin S. et Dupuis M. 1945. Essai de bilan de la matière organique des sols. *Ann. Agron.*, **1**, 17-29.
- Jenkinson D. S. et Rayner J. H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, **123**, 298-305.
- Jenny H. 1941. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. 281 p., McGraw Hill Book Co., New-York.
- Kang B. T. 1993. Changes in soil properties and crop performance with continuous cropping on an Entisol in the humid tropics. *In* : "Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture", K. Mulongoy et R. Merckx (éds.), pp. 297-305, Wiley-Sayce, Chichester.
- Kouakoua E. 1998. La matière organique et la stabilité structurale d'horizons de surface de sols ferrallitiques argileux. Effet du mode de gestion des terres. Doctorat, 221 p., Université de Nancy I, Nancy.
- Laudelout H., Cheverry C. et Calvet R. 1994. Modélisation mathématique des processus pédologiques. 264 p., Actes Edition, Rabat.

- Leinweber P., Reuter G. et Brozio K. 1993. Cation exchange capacities of organo-mineral particle-size fractions in soils from long-term experiments. *J. Soil Sci.*, **44**, 111-119.
- Leprun J. C. 1988. Matière organique et conservation des sols. Exemples brésiliens. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, **24**, 333-334.
- Machet J. M., Pierre D., Recous S. et Rémy J. C. 1987. Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **73**, 39-55.
- Manlay R. 1997. Etude de la dynamique de quelques compartiments organiques sur un terroir agro-pastoral de Haute-Casamance, Sénégal. Rapport intermédiaire de thèse, ORSTOM, Cirad-Emvt, ENGREF, Montpellier.
- Mary B. et Guérif M. 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures*, 247-257.
- Mégie C. et Bourcy P. Y. 1974. Rapport 1973-1974 de la section d'Agronomie générale de la station centrale de Bébédjia (Tchad), 117 p., Irct-Cirad, Paris.
- Mégie C. et Ehrwein J. H. 1976. Contribution à l'étude de l'évolution de la fertilité d'un sol du Continental Terminal (Koro) dans les essais pérennes de la station agronomique de Déli. *Cot. Fib. Trop.*, **31**, 240-253.
- Morant P. 1991. Caractérisation de la fragilité écologique et des potentialités agronomiques de la région de Houndé au Burkina Faso. Utilisation de différentes techniques de diagnostic. Thèse de Docteur-Ingénieur, 168 p., INPL, Nancy.
- Morel R. et Quantin P. 1972. Observations sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (République Centrafricaine). Résultats d'essais de culture mécanisée semi-intensive, sur des sols rouges ferrallitiques moyennement désaturés en climat soudano-guinéen d'Afrique Centrale. *Agron. Trop.*, **27**, 667-739.
- Navarro H. 1984. L'analyse des composantes du rendement du maïs. Application à l'étude de la variabilité du rendement dans une petite région. Thèse de Docteur-Ingénieur, 238 p., INA-PG, Paris.
- Ngamine J., Adoum M. et Guibert H. 1994. L'approche terroir en zone soudanienne du Tchad. In : "Analyse de la diversité des situations agricoles. Conséquences sur la programmation de la recherche", pp. 99-100, Cirad-ca, Montpellier.
- Obatolu C. R. et Agboola A. A. 1993. The potential of Siam weed (*Chromolaena Odorata*) as source of organic matter for soils in the humid tropics. In : "Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture", K. Mulongoy et R. Merckx (éds.), pp. 89-99, Wiley-Sayce, Chichester.

- Oliver R. et Letourmy P. 1992. Rôle respectif des différentes fractions granulométriques d'un sol dans ses propriétés physico-chimiques : mise au point d'une méthode non destructive. *Agron. Trop.*, **46**, 41-50.
- Pansu M. 1991. Détermination de quelques paramètres caractéristiques de la cinétique d'humification et de minéralisation des amendements organiques dans les sols. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, **26**, 131-144.
- Parton W. J. et Rasmussen P. E. 1994. Long-Term Effects of Residue Management in Wheat-Fallow: II. CENTURY Model Simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**, 530-536.
- Philippeau G. 1985. Théorie des plans d'expérience. Application à l'agronomie. 205 p., ITCF, Paris.
- Pias J. 1970. Note explicative n°41. Carte pédologique du Tchad à 1/1000000. 2 vol., 167 et 1 p., ORSTOM, Bondy.
- Pichot J. 1971. Etude de l'évolution du sol en présence de fumures organiques ou minérales. Cinq années d'expérimentation à la station de Boukoko (République Centrafricaine). *Agron. Trop.*, **26**, 736-754.
- Pichot J., Al Zahawe F. et Chabalier P. F. 1977. Evolution d'un sol ferrallitique de Côte d'Ivoire après la mise en culture. Effet des apports d'engrais azoté et de compost. In : "Soil organic matter studies", vol. 1, pp. 83-96, FAO, IAEA, Vienna.
- Pichot J. et Burdin S. 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. *Agron. Trop.*, **29**, 995-1005.
- Pichot J., Sédogo 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**, 122-133.
- Pieri C. 1979. Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal. *Agron. Trop.*, **32**, 9-22.
- Pieri C. 1989. Fertilité des terres de savanes. 444 p., Ministère de la Coopération, Paris.
- Pieri C. 1995. Long-Term Soil Management Experiments in Semiarid Francophone Africa. In : "Soil Management Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality", R. Lal et B. A. Stewart (éds.), pp. 225-264, CRC Press, Boca Raton.
- Plenet D., Lubet E. et Juste C. 1993. Evolution à long terme du statut carboné du sol en monoculture non irriguée du maïs (*Zea mays* L.). *Agronomie*, 685-698.

- Quiroga A. R., Buschiazzi D. E. et Peinemann N. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid argentinian pampas. *Soil Sci.*, **161**, 104-108.
- Raymond G. 1992. Gestion de la fertilité des sols et production cotonnière dans le Sud-Tchad. *Econ. Rurale*, 125-128.
- Raymond G., Tchilgue Y. et Beliazi K. 1990. Enquête suivi-évaluation 1989/90 30 villages zone soudanienne Sud-Tchad. 36 p., ONDR/DSN, Moundou, Irct-Cirad, Montpellier.
- Reyniers F. N., Baron C. et Corrado S. 1997. SARRA, logiciel opérationnel pour la valorisation agricole des ressources pluviométriques au Sahel. Compte-rendu des travaux. In : "Atelier harmonisation des outils méthodologiques de collecte, de suivi et d'analyse des données agro-socio-économiques en gestion des ressources naturelles", Dakar, 17-19 février 1997, pp. 1-25, Cirad-ca, Montpellier.
- Richard L. 1967. Evolution de la fertilité en culture intensive. *Cot. Fib. Trop.*, **22**, 357-391.
- Richard L. 1995 a. Fertilité des sols de savane et système de culture en République centrafricaine. I. Fertilité des sols et productivité. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **81**, 154-168.
- Richard L. 1995 b. Fertilité des sols de savane et système de culture en République centrafricaine. II. Intensification des productions et protection du milieu naturel. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **81**, 141-153.
- Richard L. et Djoulet D. 1985. La fertilité des sols et son évolution. Zone cotonnière du Tchad. *Cot. Fib. Trop. Sér. Documents, Etudes et Synthèse*, **Supplément n° 6**, 21 p.
- Sanchez P. A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley & Sons, Chichester.
- Saviozzi A., Riffaldi R., Levi-Minzi R. et Panichi A. 1997. Properties of soil particle size separates after 40 years of continuous corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **28**, 427-440.
- Schalscha E. B., Pratt P. F., Kinjo T. et Amar J. A. 1972. Effect of phosphate salts as saturating solutions in cation-exchange capacity determinations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36**, 912-914.
- Ségalen P. 1995. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique : les sols ferrallitiques en Afrique et en Extrême-Orient, Australie et Océanie - Conclusions générales. 201 p., ORSTOM, Paris.
- Sément G. 1980. Etude des effets secondaires de la fertilisation minérale sur le sol dans des systèmes culturaux à base de coton en Côte-d'Ivoire. Premiers résultats en matière de correction. *Cot. Fib. Trop.*, **35**, 229-248.
- Siband p. 1974. Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. *Agron. Trop.*, **29**, 1128-1248.

- Singh B. R. et Goma H. C. 1995. Long-Term Soil Fertility Management Experiments in Eastern Africa. *In* : "Soil Management Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality", R. Lal et B. A. Stewart (éds.), pp. 347-382, CRC Press, Boca Raton.
- Soil Survey Staff. 1990. Keys to soil taxonomy, SMSS Technical monograph n°19, 4th ed. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Taonda J. B. S., Bertrand R., Dickey J., Morel J. L. et Sanon K. 1995. Dégradation des sols en agriculture minière au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, **4**, 363-368.
- Tian G. et Brussaard L. 1997. Mulching effect of plant residues of chemically contrasting compositions on soil organic matter content and cation exchange capacity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **28**, 1603-1611.
- Tiessen H. et Shang C. 1998. Organic-matter turnover in tropical land-use systems. *In* : "Carbon and nutrient dynamics in natural and agricultural tropical ecosystems", L. Bergström et H. Kirchmann (éds.), pp. 1-14, CAB International, Oxon.
- Traoré M. F. 1974. Etude de la fumure minérale azotée intensive des céréales et du rôle spécifique de la matière organique dans la fertilité des sols au Mali. *Agron. Trop.*, **29**, 567-586.
- Uehara G. et Gillman G. p. 1981. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder.
- Van der Linden A. M. A., Van Veen J. A. et Frissel M. J. 1987. Modelling soil organic matter levels after long-term applications of crop residues, farmyard and green manures. *Plant Soil*, 21-28.
- Waneukem V. 1995. Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. Cas des sols cultivés en maïs de la zone Sud-Soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, 96 p., ENSA, Montpellier.
- Webb R. A. 1972. Use of Boundary Line in the analysis of biological data. *J. Hortic. Sci.*, **47**, 309-319.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arrouays D., Balesdent J., Mariotti A. et Girardin C. 1995. Modelling organic carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using C-13 natural abundance measurements. *Plant Soil*, **173**, 191-196.
- Asiegbu J. E. et Oikeh S. 1995. Evaluation of the Chemical Composition of Manures from Different Organic Wastes and their Potential for Supply of Nutrients to Tomato in a Tropical Ultisol. *Biol. Agric. Hortic.*, **12**, 47-60.
- Ataliah T., Andreux F., Choné T. et Gras F. 1995. Effect of storage and composting on the properties and degradability of cattle manure. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **54**, 203-213.
- Badiane A. N. 1993. Le statut organique d'un sol sableux de la zone Centre-Nord du Sénégal. Thèse de Doctorat, 200 p., INPL, Nancy.
- Balesdent J., Wagner G. H. et Mariotti A. 1988. Soil organic matter turnover in long-term field experiment as revealed by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**, 118-124.
- Ballo D. B. 1997. Effet des systèmes culturaux sur le statut organique de sols ferrugineux tropicaux du Mali. Rapport de DEA, 62 p., ENSA, Montpellier.
- Barnett V., Johnston A. E., Landau S., Payne R. W., Welham S. J. et Rayner A. I. 1995. Sustainability-the Rothamsted Experience. In : "Agricultural Sustainability", V. Barnett, R. Payne et R. Steiner (éds.), pp. 170-206, John Wiley & Sons, Chichester.
- Blondel D. 1971. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (dior) au Sénégal. *Agron. Trop.*, **26**, 1303-1331.
- Blondel D. 1971. Contribution à l'étude de la croissance-matière sèche et de l'alimentation azotée des céréales de culture sèche au Sénégal. *Agron. Trop.*, **26**, 709-719.
- Blondel D. 1971. Contribution à l'étude du lessivage de l'azote en sol sableux (dior) au Sénégal. *Agron. Trop.*, **26**, 687-695.
- Bosma R. et Jager B. 1992. Le fumier. Production dans les parcs et valeur. Etude Bibliographique, Rapport de Recherche, 25 p., DRSPR, IER, Sikasso.
- Boulaine J. 1987. Historique des travaux sur la capacité d'échange des sols. In : "La capacité d'échange cationique et la fertilisation des sols agricoles", AFES (éd.), pp. 1-2, Chambres d'Agriculture de Basse-Normandie, Caen.

- Bouteyre G. 1963. Etude Pédologique au 1/200000° de la région du Logone et du Moyen-Chari entre Logone et Bahr-Sara. 71 p., ORSTOM, Centre de Recherches Tchadiennes, Laboratoire de Pédologie, N'Djaména.
- Brown J. R., Osburn D. D., Redhage D. et Gantzer C. J. 1995. Multi-crop Comparisons on Sanborn Fields, Missouri, USA. In : "Agricultural Sustainability", V. Barnett, R. Payne et R. Steiner (éds.), pp. 110-132, John Wiley & Sons, Chichester.
- Cadisch G., Imhof H., Urquiaga S., Boddey R. M. et Giller K. E. 1996. Carbon turnover (d13C) and nitrogen mineralisation potentiel of particulate light soil organic matter after rainforest clearing. *Soil Biol. Biochem.*, **28**, 1555-1567.
- Cambardella C. A. et Elliott E. T. 1992. Particulate Soil Organic-Matter Changes Across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56**, 777-783.
- Capillon A. et Fleury A. 1986. Conception d'itinéraires techniques et diversité des exploitations agricoles. *Bull. Tech. Inf.*, **408**, 269-270.
- Capillon A. et Fleury A. 1986. Conception d'itinéraires techniques respectant la diversité des exploitations agricoles : les enseignements d'un essai. *Bull. Tech. Inf.*, **408**, 281-294.
- Capillon A., Fleury A. et Leterme M. J. 1986. Déterminant des pratiques agricoles et conception d'un dispositif expérimental. *Bull. Tech. Inf.*, **408**, 271-279.
- Cassman K. G. et Pingali P. L. 1995. Extrapolating Trends from Long-term Experiments to Farmers' Fields: The Case of Irrigated Rice Systems in Asia. In : "Agricultural Sustainability", V. Barnett, R. Payne et R. Steiner (éds.), pp. 62-84, John Wiley & Sons, Chichester.
- Castellanos J. Z. et Pratt P. F. 1981. Mineralization of Manure Nitrogen-Correlation with Laboratory Indexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, 354-357.
- Catroux G., Chaussod R. et Nicolardot B. 1987. Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **73**, 71-79.
- Cerri C., Feller C., Balesdent J., Victoria R. et Plenecassagne A. 1985. Application du traçage isotopique naturel en ¹³C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. 2*, **300**, 423-428.
- Charreau C. 1975. Organic matter and biochemical properties of soil in the dry tropical zone of West Africa. In : "Organic materials as fertilizers", pp. 313-335, FAO, Rome.
- Charreau C. et Tourte R. 1967. Le rôle des facteurs biologiques dans l'amélioration du profil cultural dans les systèmes d'agriculture traditionnel de zone tropicale sèche. In : "Colloque sur la fertilité des sols tropicaux", Tananarive, vol. 2, pp. 1498-1517, Irat-Cirad, Montpellier.

- Chertov O. G. et Komarov A. S. 1995. On mathematical theory of soil forming processes. 1. Theoretical background. 2. SOMM - a model of soil organic matter dynamics. 3. Basic ideas of a mineral phase modelling, report of Russian Academy of Sciences, Pushino.
- Chopart J. L. et Nicou R. 1989. Vingt ans de culture continue avec ou sans labour au Sénégal. *Agron. Trop.*, **44**, 269-281.
- Chotte J. L. 1986. Evolution d'une biomasse racinaire doublement marquée (^{14}C , ^{15}N) dans un système sol-plante : étude sur un cycle annuel d'une culture de maïs. Thèse de Doctorat, 116 p., Université de Nancy I, Nancy.
- Chotte J. L. 1988. Importance de l'activité rhizosphérique dans la dynamique de reconstitution du stock organique des sols (vertisol, Martinique). Traçage isotopique ^{15}N . *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, **24**, 345-346.
- Connin S. L., Virginia R. A. et Chamberlain C. P. 1997. Carbon isotopes reveal soil organic matter dynamics following arid land shrub expansion. *Oecologia*, **110**, 374-386.
- Crétenet M. 1993. Rapport de mission au Bénin, Cirad-ca, Montpellier.
- Crétenet M. 1994. Experimentation with cropping systems in tropical countries. Case studies of cotton growing areas of africa. In : "Recherches-Système en agriculture et développement rural", M. Sébillote (éd.), pp. 125-130, Cirad-Sar, Montpellier.
- Crétenet M., Dureau D., Traoré B. et Ballo D. 1994. Fertilité et fertilisation dans la région sud du Mali : du diagnostic au pronostic. *Agriculture et Développement*, **3**, 4-12.
- de Ridder N. et Van Keulen H. 1990. Some aspects of the role of organic matter in sustainable intensified arable farming systems in the West-African semi-arid-tropics (SAT). *Fert. Res.*, **26**, 299-310.
- de Vries W., Kros J. et Van der Salm C. 1995. Modelling the impact of acid deposition and nutrient cycling on forest soils. *Ecol. Model.*, **79**, 231-245.
- Dommergues Y. 1977. La biologie des sols. 126 p., Presses Universitaires de France, Paris.
- Douzet J. M., Vallee G., M'Biandoun M. et Essang T. Evolution d'un sol ferrugineux tropical sous l'action de divers systèmes de culture (projet de publication).
- Duff B., Rasmussen P. E. et Smiley R. W. 1995. Wheat/Fallow Systems in Semi-arid Regions of the Pacific NW America. In : "Agricultural Sustainability", V. Barnett, R. Payne et R. Steiner (éds.), pp. 85-109, John Wiley & Sons, Chichester.
- Dureau D., Ballo D., Crétenet M. et Ganry F. A paraître. Effets à long terme des pratiques culturales sur le statut organique et la fourniture d'azote d'un sol sableux du Mali. *Etude et Gestion des sol.*

- Eagleman J. R. 1971. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.*, **8**, 385-394.
- Egawa T. 1975. Utilization of organic materials as fertilizers in Japan. *In* : "Organic materials as fertilizers", pp. 253-271, FAO, Rome.
- Egoumenides C. 1989. Fractions de l'azote organique dans les sols tropicaux et fertilité azotée. *In* : "Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales", R. Bertrand et H. Saint-Macary (éds.), pp. 317-326, Irat-Cirad, Montpellier.
- Fauck R., Thomann C. et Moureaux C. 1969. Bilans de l'évolution des sols de Séfa après quinze années de culture continue. *Agron. Trop.*, **24**, 263-301.
- Feddes R. A. et Kabat P. 1994. SWAP model - Soil_Water_Atmosphere_Plant. I. Theory and Model Description. R. A. Feddes et P. Kabat (éds.), Pudoc-DLO, Wageningen.
- Feller C. 1988. Effet de différents systèmes de culture sur les stocks organiques de sols argileux tropicaux des petites Antilles. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, **24**, 341-343.
- Feller C., Brossard M. et Frossard E. 1992. Characterization and dynamics of organic matter in low activity clay soils in West Africa. *In* : "Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Regional workshop 4 : Africa", pp. 94-107, SCOPE/UNEP, Stockholm.
- Feller C., Fritsch E., Poss R. et Valentin C. 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, **26**, 25-36.
- Feller C. et Ganry F. 1982. Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système tropical. *Agron. Trop.*, **37**, 262-269.
- Feller C., Ganry F. et Cheval M. 1981. Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système 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. *Agron. Trop.*, **36**, 9-17.
- Franquin P. 1981. Modèle fréquentiel de la période climatique de végétation. Potentialités culturelles. *In* : "Colloque Informatique et Biosphère", pp. 127-177, ORSTOM, Paris.
- Freycon V. 1993. La CEC des horizons organiques de sols forestiers de l'Est de la France. Méthodes et résultats. Rapport de DEA, 51 p., Université de Nancy I, Nancy.
- Furon R., 1958. Esquisse Structurale Provisoire de l'Afrique 10 millionième. Association des Services Géologiques Africains, Paris.
- Ganry F. 1975. Importance des enfouissements de matière organique dans l'amélioration des systèmes culturels au Sénégal, rapport, Centre National de la Recherche Agronomique, Bambe.

- Ganry F., Bideau J. et Nicoli J. 1974. Action de la fertilisation azotée et de l'amendement organique sur le rendement et la valeur nutritionnelle d'un mil Souma III. *Agron. Trop.*, **29**, 1006-1115.
- Gao G. et Chang C. 1996. Changes in CEC and Particle size distribution of soils associated with long-term annual applications of cattle feedlot manure. *Soil Sci.*, **161**, 115-120.
- Gigou J. 1982. Dynamique de l'azote minéral en sol nu ou cultivé de région tropicale sèche du Nord Cameroun. Thèse de Docteur-Ingénieur, 171 p., Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- Glendining M. J. et Polwson D. S. 1995. Long-Term Soil Fertility Management Experiments in Eastern Africa. In : "Soil Management Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality", R. Lal et B. A. Stewart (éds.), pp. 385-446, CRC Press, Boca Raton.
- Godwin D. C. et Singh U. 1998. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In : "Understanding Options for Agricultural Production", G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom et P. K. Thornton (éds.), pp. 400, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Greenland D. J. 1980. The nitrogen Cycle in West Africa - Agronomic considérations. In : "Nitrogen Cycling in West African Ecosystems", T. Rosswall (éd.), pp. 73-80, SCOPE/UNEP, Stockholm.
- Gückert A. 1973. Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et leur rôle dans les mécanismes d'aggrégation. Thèse de Doctorat, 124 p., Université de Nancy I, Nancy.
- Guiraud G. 1984. Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Thèse de Doctorat, 335 p., Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Jandl R. et Sollins P. 1997. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle. *Biol. Fertil. Soils*, **25**, 196-201.
- Jarvis S. C., Stockdale E. A., Shepherd M. A. et Powlson D. S. 1996. Nitrogen Mineralization in Temperate Agricultural Soils: Processes and Measurement. *Adv. Agron.*, **57**, 188-235.
- Jastrow J. D., Boutton T. W. et Miller R. M. 1996. Carbon Dynamics of Aggregate-Associated Organic Matter Estimated by Carbon-13 Natural Abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**, 801-807.
- Jenkinson D. S. 1991. The Rothamsted Long-Term Experiments: Are They Still of Use? *Agron. J.*, **83**, 2-10.
- Jolivet C., Arrouays D., Andreux F. et Lévêque J. 1997. Soil organic carbon dynamics in cleared temperate forest spodosols converted to maize cropping. *Plant Soil*, **191**, 225-231.

- Jones M. J. 1976. The significance of crop residues to the maintenance of fertility under continuous cultivation at Samaru, Nigeria. *J. agric. Sci.*, **86**, 117-125.
- Kabat P. et Feddes R. A. 1994. SWAP model - Soil_Water_Atmosphere_Plant. II. Model Execution and Case Studies. P. Kabat et R. A. Feddes (éds.), Pudoc-DLO, Wageningen.
- Kone M. 1989. Evolution de la fertilité sous divers mode de fertilisation (24 ans). In : "1ère Conférence de la recherche cotonnière Africaine", Lomé, 31 janvier - 2 février, vol. 1, pp. 441-452, Coopération Française, CTA, FAO, ICAC, Irct-Cirad, Montpellier.
- Larney F. J., Bremer E., Janzen H. H., Johnston A. M. et Lindwall C. W. 1997. Changes in total, mineralizable and light fraction soil organic matter with cropping and tillage intensities in semiarid southern Alberta, Canada. *Soil Till. Res.*, **42**, 229-240.
- Lefroy R. D. B., Blair G. J. et Strong W. M. 1993. Changes in Soil Organic Matter with Cropping as Measured by Organic Carbon Fractions and C-13 Natural Isotope Abundance. *Plant Soil*, **156**, 399-402.
- Leinweber P., Schulten H. R. et Korschens M. 1995. Hot water extracted organic matter: Chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. *Biol. Fertil. Soils*, **20**, 17-23.
- Lespinois d., Griveau, Hirsch, Larrieu et Georges 1967. Etude de la vallée du Mandoul. 4 vol., République du Tchad, Ministère de l'Agriculture et de la Production Animale, BDPA, Paris.
- L'Hôte Y. et Mahé G., 1996. Afrique de l'Ouest et Centrale précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). ORSTOM éditions, Paris.
- Maignien R. 1961. Le passage des sols ferrugineux aux sols ferrallitiques dans les régions Sud-Ouest du Sénégal. *Sols Afr.*, **6**, 113-172.
- Manichon H. 1996. Les indicateurs de diagnostic et de suivi des problèmes de fertilité. Exposé introductif. In : "Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. Actes du séminaire.", J. Pichot, N. Sibelet et J. J. Lacoëuilhe (éds.), pp. 547-550, Ministère de la Coopération, Cirad-Sar, Montpellier.
- Martin A., Mariotti A., Balesdent J., Lavelle P. et Vuattoux R. 1990. Estimate of organic matter turnover rate in a fractions of microbial origin. *Soil Biol. Biochem.*, **22**, 517-523.
- Martin J. K. et Merckx R. 1993. The partitioning of derived carbon within the rhizosphere of arable crops. In : "Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture", Leuven (Belgium), 4-6 november 1991, K. Mulongoy et R. Merckx (éds.), pp. 101-120, Wiley-Sayce, Chichester.
- Mary B. 1987. Effets du précédent cultural sur la disponibilité du sol en azote minéral. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **73**, 57-69.

- Mitchell C. C., Westerman R. L., Brown J. R. et Peck T. R. 1991. Overview of Long-Term Agronomic Research. *Agron. J.*, **83**, 24-29.
- Nacro H. B., Benest D. et Abbadie L. 1996. Distribution of microbial activities and organic matter according to particle size in a humide savanna soil (Lampto, Côte d'Ivoire). *Soil Biol. Biochem.*, **28**, 1687-1697.
- Naidu R., McClure S., McKenzie N. J. et Fitzpatrick R. W. 1996. Soil solution composition and aggregate stability changes caused by long-term farming at four contrasting sites in South Australia. *Aust. J. Soil Res.*, **34**, 511-527.
- Nambiar K. K. M. 1995. Major Cropping Systems in India. In : "Agricultural Sustainability", V. Barnett, R. Payne et R. Steiner (éds.), pp. 133-169, John Wiley & Sons, Chichester.
- Ndandou J. F. N. 1998. Variation du stock organique et des propriétés physiques d'un vertisol sous prairie après la mise en culture maraîchère : effet du travail du sol. Thèse de Doctorat, 133 p., ENSA, Montpellier.
- Nicolardot B., Molina J. A. E. et Allard R. 1994. C and N fluxes between pools of soil organic matter: model calibration with long-term incubation data. *Soil Biol. Biochem.*, **26**, 235-243.
- Oades J. M. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. In : "Minerals in soil environments", J. B. Dixon et S. B. Weed (éds.), pp. 1-89, Soil Science Society of America, Madison.
- Oades J. M., Gillman G. P. et Uehara G. 1989. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In : "Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems", J. M. Oades et G. Uehara (éds.), vol. Chap. 3, pp. 69-95, NifTAL Project, Hawai University.
- Oliver R. et Ganry F. 1994. Etude des modifications de fertilité induites par une jachère arborée. Cas de la zone forestière de Centre Côte-d'Ivoire, CIRAD, Montpellier, 30 p.
- Orsini L. et Remy J. C. 1976. Utilisation du chlorure de cobaltihexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Bull. Assoc. Fr. Etude Sol*, 269-275.
- Padwick G. W. 1983. Fifty years of Experimental Agriculture. II. The maintenance of soil fertility in tropical Africa: a review. *Exp. Agr.*, **19**, 293-310.
- Parfitt R. L., Giltrap D. J. et Whitton J. S. 1995. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **26**, 1343-1355.
- Parton W. J., Anderson D. W., Cole C. V. et Stewart J. W. B. 1983. Simulation of soil organic matter formations and mineralization in semiarid agroecosystems. In : "Nutrient cycling in Agricultural Ecosystems", R. R. Lowrance (éd.), pp. 533-550, University of Georgia.

- Pedro G. 1987. Dynamique des ions dans le sol. Rôle de la CEC. Influence des grands types d'argile. *In* : "La capacité d'échange cationique et la fertilisation des sols agricoles", AFES (éd.), pp. 13-44, Chambres d'Agriculture de Basse-Normandie, Caen.
- Pichot J. 1975. Rôle de la matière organique dans la fertilité des sols. *Agron. Trop.*, **30**, 170-175.
- Rasmussen P. E. et Parton W. J. 1994. Long-Term Effects of Residue Management in Wheat-Fallow: I. Inputs, Yield, and Soil Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**, 523-530.
- Richard L. 1977. Rapport de mission au Tchad. 1977/07/10-19, Ircet-Cirad, Paris.
- Richard L. 1978. Rapport de mission au Tchad : 28 septembre au 10 octobre 1978, Ircet-Cirad, Paris.
- Richard L. 1980. Rapport de mission au Tchad du 26 octobre au 24 novembre 1980, Ircet-Cirad, Paris.
- Richard L. 1980. Rapport de mission au Tchad du 28 avril au 5 juin 1980, Ircet-Cirad, Paris.
- Richard L. et Bekayo N. 1981. Station de Bébédjia, Tchad. Rapport d'agronomie générale 1980, Ircet-Cirad, Paris.
- Romero J. J. 1995. Contribution à la minéralisation du carbone et de l'azote des matières organiques associées aux fractions granulométriques d'un sol ferrallitique. Effet du mode de gestion des sols. Rapport de Certificat d'Etudes Supérieures d'Agronomie, 36 p., ENSA, Montpellier.
- Ruiz L., Ganry F., Waneukem V., Oliver R. et Siband P. 1995. Les indicateurs de la fertilité azotée des terres en région tropicale semi-aride. *Agriculture et Développement*, **5**, 38-46.
- Sanchez P. A. et Logan T. J. 1992. Myths and Science about the Chemistry and Fertility of Soils in the Tropics. *In* : "Myths and Science of Soils of the Tropics", R. Lal et P. A. Sanchez (éds.), pp. 35-46, Soil Science Society of America Inc, Madison.
- Schnitzer M. et Khan S. U. (éds.). 1996. Soil Organic Matter Developpement in soil Science, 319 p., Elsevier, Amsterdam.
- Schleich K. 1986. Le fumier peut-il remplacer la jachère? Possibilité d'utilisation du fumier : exemple de la savane d'Afrique occidentale. *Rev. Elev. Méd. Vét. Pays Trop.*, **39**, 97-102.
- Sébillotte M. 1980. Fertilité et système de production en région de grande culture, DGRST, Comité ECAR, Projet pour une Action Concertée de Recherche.
- Sébillotte M. 1989. Fertilité et systèmes de production. Essai de problématique générale. *In* : "Fertilité et systèmes de production", M. Sébillotte (éd.), pp. 13-57, INRA, Paris.

- Sébillotte M. 1996. Culture (systèmes de). In : "Encyclopedia Universalis", A. Aubry et L. Lecompte (éds.), vol. 6, pp. 958-961, Encyclopedia Universalis Editeur, Paris.
- Sédogo 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, 198 p., INPL, Nancy.
- Sédogo M. P. 1992. 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 Doctorat d'Etat, 300 p., Abidjan.
- Sément G. 1983. La fertilité des systèmes cultureux à base de cotonnier en Côte-d'Ivoire. Neuf années d'expérimentation et d'observations multilocales (1973-1982). *Cot. Fib. Trop. Sér. Documents, Etudes et Synthèse, Supplément n° 4*, 40 p.
- Siband P., Wey J., Oliver R., Letourmy P. et Manichon H. A paraître. Analysis of the yield of two groups of tropical maize cultivars. Varietal characteristics, yield potentials, optimum densities. *Agronomie*.
- Stanford G. et Smith S. J. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **36**, 465-472.
- Stout J. D., Goh K. M. et Rafter T. A. 1981. Chemistry and turnover of naturally occurring resistant organic compounds in soil. In : "Soil Biochemistry", E. A. Paul (éd.), pp. 1-73, Marcel Dekker.
- Taonda S. J. B. 1995. Evolution de la fertilité des sols sur un front pionnier en zone Nord-soudanienne (Burkina Faso). Thèse de Doctorat, 199 p., INPL, Nancy.
- Tiessen H. et Stewart J. W. B. 1983. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, 509-514.
- Traoré S. et Harris P. J. 1995. Long-Term Fertilizer and Crop Residue Effects on Soil and Crop Yields in the Savanna Region of Côte d'Ivoire. In : "Soil Management Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality", R. Lal et B. A. Stewart (éds.), pp. 141-180, CRC Press, Boca Raton.
- Traxler G., Novak J., Mitchell C. C., Runge J. et Runge M. 1995. Long-term Cotton Productivity Under Organic, Chemical, and No Nitrogen Fertilizer Treatments, 1896 to 1992. In : "Agricultural Sustainability", V. Barnett, R. Payne et R. Steiner (éds.), pp. 41-61, John Wiley & Sons, Chichester.
- Triomphe B. 1994. Fertilité des sols dans la rotation maïs/mucuna, côte nord du Honduras : premiers résultats, Rapport adapté de la conférence présentée au CIMMYT, El Batan, Mexico, 21 juin 1994, 12 p., Cirad, Montpellier.

- Triomphe B. L. 1996. Seasonal nitrogen dynamics and long-term changes in soil properties under the mucuna/maize cropping system on the hillsides of Northern Honduras. Rapport de Ph-D, 217 p., Cornell University, Ithaca.
- Van Wambeke A. 1992. Soils of the Tropics. J. Bertuna (éd.), 343 p., Mc Graw-Hill, Inc. New-York.
- Vanlauwe B., Oorts K., Diels J., Lyasse O., Sanginga N. et Merckx R. 1998. Contribution of particle-size soil organic matter fractions to the soil N supply and cation exchange capacity for soils from the West African moist savanna. In : "16^{ième} World Congress of Soil Science", Montpellier, 20-26/08/1998, document électronique, 1 CD-ROM, présentation N°750, ISSS, AISS, IBG, SICS, AFES, Montpellier.
- Velly J., Egoumenides C. et Pichot J. 1980. L'azote extractible par une solution de KCl et la fourniture d'azote à la plante dans 40 sols tropicaux. *Agron. Trop.*, **35**, 374-380.
- Verberne E. L. J., Hassink J., de Willigen P., Groot J. J. R. et van Veen J. A. 1990. Modelling organic matter dynamics in different soils. *Neth. J. Agric. Sci.*, **38**, 221-238.
- Vong P. C. 1987. Contribution à l'étude cinétique des différents compartiments azotés contenus dans les sols cultivés après apports de fertilisants minéraux et organiques. Thèse de Doctorat, 217 p., INPL, Nancy.
- Waneukem V. 1991. Test de diagnostic de la fertilité azotée d'un sol tropical. Essai de validation in situ d'un indicateur chimique du sol. rapport de DEA report, 39 p., INPT, Toulouse.
- Warren G. P. et Meredith J. A. 1998. Isotopic composition of organic carbon in some soils of semiarid Africa. In : "Carbon and nutrient dynamics in natural and agricultural tropical ecosystems", L. Bergström et H. Kirchmann (éds.), pp. 23-32, CAB International, Oxon.
- Wey J. 1998. Etude de la variabilité du rendement du maïs au Burkina Faso. Doctorat, 200 p., INPL, Nancy.
- Wey J., Oliver R., Manichon H. et Siband P. 1998. Analysis of local limitations to maize yield under tropical conditions. *Agric. Environ.*, 545-561.
- Williams T. O., Powell J. M. et Fernandez-Rivera S. 1995. Soil Fertility Maintenance and Food Crop Production in Semi-Arid West Africa: Is Reliance on Manure a Sustainable Strategy? *Outlook Agric.*, **24**, 43-47.
- Yaghi M. 1973. Action de certains substrats carbonés sur l'humification de la matière organique de divers sols. Thèse de Doctorat, 59 p., Université Nancy I, Nancy.
- Zsolnay A. et Gorlitz H. 1994. Water Extractable Organic Matter in Arable Soils - Effects of Drought and Long-Term Fertilization. *Soil Biol. Biochem.*, **26**, 1257-1261.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Annexe I-1 : Opérations culturales réalisées sur les parcelles de cotonnier et densités à la récolte (nombre de plants ha ⁻¹), diagnostic agronomique, Tchad, 1994.	143
Annexe I-2 : densités à la récolte (nombre de plants ha ⁻¹), rendements en coton-graine (kg ha ⁻¹) et taux de satisfaction des besoins en eau des cultures (C.S.H., en %) phase 1, entre le semis et 30 jours après semis et phase 4, entre les 90 et 120 ^{ième} jours de la culture, diagnostic agronomique, Tchad, 1994.	145
Annexe I-3 : Caractéristiques physico-chimiques des sols, prélèvement 0-10 cm, diagnostic agronomique, Tchad, 1994.	147
Annexe I-4 : Caractéristiques physico-chimiques des sols, prélèvements 0-10 cm et 10-20 cm, diagnostic agronomique, Tchad, 1994.	149
Annexe II-1 : niveaux et variations de teneurs en C et N totaux des sols et leurs principales corrélations avec d'autres caractéristiques physico-chimiques du sol et rendements constatés par diagnostic en milieu réel en Afrique sub-saharienne.	151
Annexe II-2 : Quantités de N, P et K, apportés sur les traitements apports d'engrais et apports de MO sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad.	153
Annexe II-3 : pluviométrie journalière année 1991, station de Bébédjia, Tchad.	154
Annexe II-4 : pluviométrie journalière année 1992, station de Bébédjia, Tchad.	155
Annexe II-5 : pluviométrie journalière année 1993, station de Bébédjia, Tchad.	156
Annexe II-6 : pluviométrie journalière année 1994, station de Bébédjia, Tchad.	157
Annexe II-7 : profil pédologique de sol beige, station de Bébédjia, Tchad.	158
Annexe II-8 : caractéristiques physico-chimiques initiales des sols des essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, prélèvement 0-20 cm.	159
Annexe II-9 : opérations culturales sur l'essai B1, station de Bébédjia, Tchad.	160
Annexe II-10 : opérations culturales sur l'essai B4, station de Bébédjia, Tchad.	161
Annexe II-11 : teneurs en éléments minéraux des différentes matières organiques produites et utilisées sur les essais B4 et B1 de 1991 à 1995, station de Bébédjia, Tchad.	162
Annexe II-12 : teneurs en éléments minéraux du compost utilisés sur l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.	164
Annexe II-13 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha ⁻¹) - année 1993 - Essai B1, Bébédjia, Tchad.	165
Annexe II-14 : analyses statistiques du rendement en maïs-grain (kg ha ⁻¹) - année 1994 - Essai B1, Bébédjia, Tchad.	166
Annexe II-15 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha ⁻¹) - année 1995 - Essai B1, Bébédjia, Tchad.	167
Annexe II-16 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha ⁻¹) - année 1991 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.	168
Annexe II-17 : analyses statistiques du rendement en maïs grain (kg ha ⁻¹) - année 1992 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.	169
Annexe II-18 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha ⁻¹) - année 1993 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.	170
Annexe II-19 : analyses statistiques du rendement en maïs grain (kg ha ⁻¹) - année 1994 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.	171
Annexe III-1 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.	172

Annexe I-1 : Opérations culturales réalisées sur les parcelles de cotonnier et densités à la récolte (nombre de plants ha⁻¹), diagnostic agronomique, Tchad, 1994.

Village	Numéro essai	Nombre de désherbage	Délais labour*	Délais semis*	Délais levée*	Délais démariage **	Délais épandage engrais**	Délais premier désherbage**	Délais second désherbage**	Délais premier traitement**	Délais première récolte**	Densité D0 B1***	Densité D0 B2***
Bogoye	1	5	15	11	9	18	11	18	36	52	157	39619	37037
Bogoye	2	5	10	13	13	17	7	17	33	48	153	39061	49422
Bogoye	3	4	25	7	7	24	13	24	42	54	159	46061	50909
Bogoye	6	5	34	14	15	27	5	27	44	46	151	52083	49167
Bogoye	7	5	12	16	17	25	3	25	56	44	149	42194	48000
Bogoye	8	5	17	13	14	19	6	19	34	47	153	88889	60889
Bogoye	9	5	28	15	15	18	6	18	32	46	159	38384	41393
Bogoye	10	5	25	9	10	21	11	21	41	51	164	42745	45556
Bogoye	11	4	33	12	14	20	7	20	40	47	160	37315	33604
Bogoye	12	5	14	6	6	20	15	20	35	55	163	34178	42311
Bogoye	13	5	33	13	14	19	7	19	34	47	154	61639	54167
Bogoye	21	5	28	7	10	26	13	26	42	52	160	58571	58495
Bogoye	22	5	31	11	14	10	12	22	37	48	156	35897	45432
Bogoye	23	5	27	7	8	15	18	25	39	54	163	52513	70960
Bogoye	24	5	25	9	12	14	14	14	34	50	158	52789	45490
Donangda	1	3	0	13	14	1	2	12	57	56	148	70383	64368
Donangda	2	3	0	17	18	1	3	11	37	52	131	31727	48374
Donangda	3	2	0	19	18	0	3	15	53	52	130	58786	72966
Donangda	4	3	30	17	18	1	3	10	36	52	154	56490	59603
Donangda	5	3	30	22	19	1	5	12	49	51	135	55082	84961
Donangda	9	3	0	22	22	1	4	12	30	48	130	54849	66882
Donangda	10	2	30	21	21	1	6	6	49	49	133	61357	55556
Donangda	11	2	46	24	23	1	5	6	61	47	133	67870	46414
Donangda	17	2	30	28	29	0	0	13	48	41	127	50692	28148
Ndjoy	1	5	20	0	0	17	18	17	50	50	182	38476	41090
Ndjoy	2	5	24	1	1	16	17	16	42	49	161	66667	55172
Ndjoy	3	5	25	8	8	11	12	11	39	42	170	45703	52593
Ndjoy	4	4	23	3	6	15	16	15	44	44	164	53333	42424
Ndjoy	5	5	23	0	0	18	19	18	48	50	160	41499	31710
Ndjoy	6	5	33	11	10	11	12	11	40	40	157	60806	54682

* Nombre de jours entre la réalisation de l'opération sur le test et la réalisation de l'opération la plus précoce sur l'ensemble des tests. ** Nombre de jours après semis. ***Dx By : donnée pour la dose x, répétition y.

Annexe I-1 (suite).

Village	Numéro essai	Nombre de désherbage	Délais labour*	Délais semis*	Délais levée*	Délais démariage**	Délais épandage engrais**	Délais premier désherbage**	Délais second désherbage**	Délais premier traitement**	Délais première récolte**	Densité D0 B1***	Densité D0 B2***
Ndjoy	7	5	23	0	0	17	18	17	37	50	166	56889	52142
Ndjoy	10	5	35	12	10	7	8	7	31	40	159	54545	57436
Ndjoy	20	4	35	12	10	18	19	18	40	40	160	55285	63768
Ngoko	1	3	40	16	15	20	22	20	58	39	132	55467	67232
Ngoko	2	3	43	19	15	18	19	18	61	39	133	77401	78865
Ngoko	3	3	39	16	15	14	16	14	56	39	134	68526	75141
Ngoko	4	3	40	16	15	19	20	19	46	39	123	58687	70355
Ngoko	5	3	36	14	10	20	21	20	53	44	133	78400	71429
Ngoko	6	3	43	19	15	19	19	19	48	39	130	68347	55134
Ngoko	7	3	42	19	15	16	16	16	50	39	130	57143	62222
Ngoko	8	3	40	16	14	17	17	17	58	40	124	59495	72678
Ngoko	10	4	38	16	16	14	15	14	35	38	129	58953	79377
Tchanar	1	2	31	8	9	4	4	10	53	62	124	59896	64499
Tchanar	2	2	31	5	5	8	8	4	73	66	128	56667	31698
Tchanar	3	2	31	8	9	4	4	7	53	62	129	78462	75714
Tchanar	4	2	31	8	9	7	9	7	40	62	129	37011	55827
Tchanar	5	2	31	8	9	4	5	12	43	62	138	59009	66200
Tchanar	6	2	31	8	9	5	5	12	49	62	123	55980	47083
Tchanar	7	2	31	9	9	3	4	3	68	62	124	53133	38801
Tchanar	8	2	31	9	11	5	6	10	58	60	120	46612	45684
Tchanar	9	2	31	9	11	5	5	11	40	60	116	41333	35556
Tchanar	10	2	31	9	10	6	6	8	39	61	138	56089	73309
Tchanar	11	2	31	9	11	4	5	15	38	60	118	47816	44780
Tchanar	12	2	31	7	11	5	13	8	73	60	132	39024	43077
Tchanar	13	2	31	12	13	7	7	5	4	58	134	50000	53333
Tchanar	14	2	31	10	15	5	5	6	56	56	123	71467	94000
Tchanar	15	3	31	13	18	8	12	8	40	53	121	51661	50677

* Nombre de jours entre la réalisation de l'opération sur le test et la réalisation de l'opération la plus précoce sur l'ensemble des tests. ** Nombre de jours après semis. ***Dx By : donnée pour la dose x, répétition y.

Annexe I-2 : densités à la récolte (nombre de plants ha⁻¹), rendements en coton-graine (kg ha⁻¹) et taux de satisfaction des besoins en eau des cultures (C.S.H., en %) phase 1, entre le semis et 30 jours après semis et phase 4, entre les 90 et 120^{ème} jours de la culture, diagnostic agronomique, Tchad, 1994.

Village	Numéro essai	Densité D1 B1*	Densité D1 B2	Densité D2 B1	Densité D2 B2	Densité D3 B1	Densité D3 B2	Rende- ment D0 B1	Rende- ment D0 B2	Rende- ment D1 B1	Rende- ment D1 B2	Rende- ment D2 B1	Rende- ment D2 B2	Rende- ment D3 B1	Rende- ment D3 B2	C.S.H. Phase 1	C.S.H. Phase 4
Bogoye	1	64444	51795	48627	51321	50256	36952	1390	1432	1889	1846	1725	1962	2923	2210	93	92
Bogoye	2	29361	39061	48980	47700	39619	33143	1559	1422	1451	1221	2196	2310	1848	1676	93	91
Bogoye	3	44444	56517	44718	44021	56250	37500	2101	2788	2333	2527	2421	2265	2458	2125	91	93
Bogoye	6	63556	48362	42083	39570	38756	40860	1729	1479	1733	2124	1500	2086	1244	1634	93	91
Bogoye	7	54000	47792	52667	50667	49700	44000	1148	1967	1633	1835	1833	2017	1851	1967	93	89
Bogoye	8	81250	76940	89787	87500	65231	54645	2709	1689	2521	2710	2469	2646	2482	2033	93	91
Bogoye	9	36047	41762	41720	48227	45977	44444	1232	1353	1395	1341	1914	1601	1398	1481	92	90
Bogoye	10	47917	52947	41143	55238	37333	64410	1333	1185	1229	1469	1390	1429	1105	2318	92	93
Bogoye	11	33557	60741	28986	41472	33684	46136	1229	813	1655	1457	1093	1226	1731	1476	93	92
Bogoye	12	43333	44685	33846	32900	39611	37193	2254	1956	1667	1928	1538	1316	1733	1596	91	93
Bogoye	13	53901	58537	48710	52935	61692	49020	1770	2021	1601	2033	2043	1851	1871	1843	93	91
Bogoye	21	50370	52917	53778	56667	42667	52822	2429	2473	2201	2062	2489	2479	2031	1981	91	93
Bogoye	22	34152	44444	43200	49455	42573	36923	1538	2099	1778	2030	1653	2109	1988	1821	93	92
Bogoye	23	61692	79548	72889	61921	62514	56949	1251	1966	1592	1288	1867	1672	1617	1650	91	93
Bogoye	24	43333	56111	36667	49444	48889	58333	1850	1438	1556	1417	1528	1472	1667	1944	92	93
Donangda	1	76836	67117	67593	73176	70968	65359	918	1195	1424	1351	1366	1369	1398	1264	89	89
Donangda	2	55901	43769	33333	57064	40895	45759	1124	1159	1201	1094	1131	1344	1342	1144	90	84
Donangda	3	47875	69967	68701	63750	58724	68981	682	840	738	1144	1107	896	963	1227	90	80
Donangda	4	61059	58029	69945	83747	64686	58359	872	1126	1059	842	1071	1433	1540	1094	90	84
Donangda	5	58885	56512	61842	59574	64840	65018	2098	2481	2376	1435	1579	1206	2123	1508	91	74
Donangda	9	53770	80231	57634	59107	66893	62430	1115	777	831	1154	968	916	791	870	91	74
Donangda	10	59710	44103	56388	56801	57997	49431	442	322	290	385	617	658	329	293	91	76
Donangda	11	53710	75088	70440	51429	62434	50190	433	190	424	456	579	429	608	380	91	70
Donangda	17	42230	48958	40615	33563	43882	30476	362	395	451	443	738	437	654	405	91	59
Ndjoy	1	35676	33020	42963	42593	36667	43290	1200	1321	1063	1421	907	1551	1185	1558	92	95
Ndjoy	2	51064	59690	59871	62121	52004	57033	2037	1992	1950	2132	2204	1913	1975	2408	91	94
Ndjoy	3	62396	46790	55493	41226	56522	53184	1020	1370	1560	1566	968	1226	1739	1367	92	94
Ndjoy	4	51717	53162	53165	53257	44309	53725	2040	1705	2283	1951	2363	1475	2256	2216	92	94
Ndjoy	5	43804	41056	42371	34002	37537	37449	1902	1490	2248	1310	1730	1127	2346	1543	92	95

*Dx By : donnée pour la dose x, répétition y.

Annexe I-2 (suite).

Village	Numéro essai	Densité D1 B1*	Densité D1 B2*	Densité D2 B1*	Densité D2 B2*	Densité D3 B1*	Densité D3 B2*	Rende- ment D0 B1*	Rende- ment D0 B2*	Rende- ment D1 B1*	Rende- ment D1 B2*	Rende- ment D2 B1*	Rende- ment D2 B2*	Rende- ment D3 B1*	Rende- ment D3 B2*	C.S.H. Phase 1	C.S.H. Phase 4
Ndjoy	7	56566	49103	44333	49680	55649	49564	1084	1583	1414	1586	983	1050	1270	1134	92	95
Ndjoy	10	52263	46914	56578	55901	51921	50813	1212	1682	1420	1523	1345	1470	1329	1260	93	93
Ndjoy	20	51524	57900	51187	54638	44985	57143	1565	1698	1573	1468	1445	2080	1743	1581	93	93
Ngoko	1	56667	55689	58231	68800	59085	72977	720	1158	1000	884	762	693	837	850	93	89
Ngoko	2	79883	83972	82540	84444	84594	72925	819	1220	852	1305	476	1111	1261	680	94	88
Ngoko	3	63415	66667	63745	66125	71038	77366	637	1045	921	1010	983	1084	1175	1289	93	89
Ngoko	4	74783	64730	68800	69116	71077	59204	695	1163	1014	1217	960	952	1064	1119	93	89
Ngoko	5	70028	63842	60881	87778	66926	98156	1013	688	1401	1102	881	1306	934	1106	93	91
Ngoko	6	66667	78679	64092	66946	65172	65000	868	956	1051	1231	687	1311	987	1222	94	88
Ngoko	7	68073	70000	61494	72269	56989	62041	789	889	872	972	1178	1036	672	735	94	88
Ngoko	8	55026	47467	54400	55061	65339	65306	1116	1366	979	1200	827	1457	1195	1279	93	89
Ngoko	10	72680	52020	46561	68455	76653	83607	2066	1997	1961	1515	1878	2043	2051	2486	93	89
Tchanar	1	48810	66421	53129	62977	48571	44286	1302	949	655	1181	920	1156	690	810	89	93
Tchanar	2	52267	32201	48309	41761	55238	52267	1048	1082	613	528	531	830	381	587	89	94
Tchanar	3	79048	69630	83269	73709	63091	77859	667	881	786	815	920	869	652	779	89	93
Tchanar	4	37701	70400	68217	37241	46975	38314	451	298	759	347	1034	372	498	358	89	93
Tchanar	5	54567	71014	80217	70313	65390	65747	135	373	261	435	488	573	332	345	89	93
Tchanar	6	47111	62585	46289	64533	54843	45291	789	2000	1622	1524	1484	1707	1434	1693	89	93
Tchanar	7	43457	44889	52398	59753	54201	58272	827	388	420	289	678	889	921	469	88	92
Tchanar	8	59710	40580	70621	38482	61818	59733	488	558	319	232	311	542	427	394	88	92
Tchanar	9	54902	41538	60513	34943	43333	32381	1911	2156	1985	1103	2205	1540	1738	1410	88	92
Tchanar	10	66667	60000	60025	56089	57565	57471	1402	1156	1744	1000	1230	1255	1402	1057	88	92
Tchanar	11	50000	52778	43951	47407	41441	51824	575	327	703	333	593	420	586	327	88	92
Tchanar	12	43077	44103	40000	45528	49744	42564	407	538	538	590	639	705	513	615	89	93
Tchanar	13	54788	61429	58182	64403	60121	39080	190	359	267	429	242	403	291	161	90	90
Tchanar	14	71304	67143	73430	72817	71282	77302	187	567	203	357	145	418	308	441	88	91
Tchanar	15	43379	46545	48216	42381	49811	62424	271	246	228	315	369	310	201	242	89	89

*Dx By : donnée pour la dose x, répétition y.

Annexe I-3 : Caractéristiques physico-chimiques des sols, prélèvement 0-10 cm, diagnostic agronomique, Tchad, 1994.

Village	Numéro essai	Argile (g kg ⁻¹)	Limon fin (g kg ⁻¹)	Limon grossier (g kg ⁻¹)	Sable fin (g kg ⁻¹)	Sable grossier (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Ca éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Mg éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	K éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Na éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Mn éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Al éch.* (cmol _c kg ⁻¹)
Bogoye	1	79	50	77	389	406	4,1	0,36	5,5	2,28	0,42	0,06	0,04	0,06	0
Bogoye	2	89	78	103	345	386	7,3	0,61	15	3,18	0,68	0,18	0,05	0,05	0
Bogoye	3	121	77	147	415	240	7,2	0,6	4,5	3,54	0,77	0,08	0,05	0,04	0
Bogoye	6	92	70	119	394	324	5,8	0,45	8,35	2,68	0,66	0,14	0,04	0,07	0
Bogoye	7	89	53	107	384	366	6,6	0,48	8,5	2,86	0,63	0,09	0,06	0,08	0
Bogoye	8	105	89	91	364	352	6,5	0,54	23	2,9	0,81	0,14	0,07	0,13	0
Bogoye	9	100	63	92	368	377	5,5	0,43	19,6	2,43	0,63	0,12	0,05	0,08	0
Bogoye	10	140	102	103	351	304	6,7	0,58	12	3,68	0,62	0,09	0,06	0,03	0
Bogoye	11	90	111	119	367	314	6,2	0,51	14,5	3,22	0,59	0,15	0,09	0,02	0
Bogoye	12	135	89	241	218	318	5,1	0,43	13,5	2,24	0,69	0,1	0,06	0,14	0
Bogoye	13	68	74	91	348	418	4,5	0,41	7,8	1,74	0,49	0,14	0,04	0,12	0
Bogoye	21	79	40	78	441	361	3,9	0,35	16	2,29	0,53	0,11	0,05	0,07	0
Bogoye	22	70	41	67	449	373	4	0,36	35,2	2,53	0,5	0,14	0,05	0,02	0
Bogoye	23	73	73	118	412	324	4,5	0,34	7,4	2,03	0,48	0,12	0,06	0,12	0
Bogoye	24	91	56	86	362	405	4,5	0,43	12,4	2,08	0,54	0,09	0,05	0,08	0
Donangda	1	33	31	40	313	583	4,8	0,39	88	1,72	0,41	0,15	0,05	0,06	0
Donangda	2	56	15	29	327	573	3	0,28	36,5	1,32	0,36	0,09	0,04	0,03	0
Donangda	3	40	24	36	289	611	2,7	0,27	60	1,42	0,32	0,08	0,04	0,03	0
Donangda	4	52	34	44	359	512	5,7	0,49	17	2,74	0,64	0,16	0,04	0,03	0
Donangda	5	57	27	43	341	533	3	0,28	29,3	1,46	0,47	0,22	0,03	0,03	0
Donangda	9	54	39	34	269	603	2,2	0,2	9,25	1,01	0,25	0,09	0,03	0,04	0
Donangda	10	31	31	45	382	512	3,1	0,25	10,55	1,25	0,34	0,15	0,04	0,04	0
Donangda	11	29	37	37	373	524	2,1	0,25	13	1,05	0,29	0,16	0,04	0,03	0
Donangda	17	57	25	36	327	555	2,2	0,25	8,5	0,71	0,25	0,11	0,03	0,08	0,01
Ndjoy	1	50	31	31	207	682	4,1	0,4	9,4	1,57	0,41	0,17	0,05	0,09	0
Ndjoy	2	62	30	22	186	699	5,1	0,54	21,5	1,69	0,51	0,13	0,05	0,06	0
Ndjoy	3	41	28	21	143	766	4,7	0,43	26,9	1,3	0,46	0,08	0,04	0,1	0
Ndjoy	4	67	32	35	234	633	5,3	0,42	69,8	1,94	0,88	0,25	0,06	0,02	0
Ndjoy	5	59	34	31	211	665	4,6	0,39	31,2	2,04	0,43	0,2	0,04	0,01	0

* Complexe d'échange par la méthode utilisant comme échangeur le chlorure de cobaltihexammine

Annexe I-3 (suite).

Village	Numéro essai	Argile (g kg ⁻¹)	Limon fin (g kg ⁻¹)	Limon grossier (g kg ⁻¹)	Sable fin (g kg ⁻¹)	Sable grossier (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Ca éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Mg éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	K éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Na éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Mn éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Al éch.* (cmol _c kg ⁻¹)
Ndjoy	7	59	31	35	211	664	5,2	0,39	15,15	2,53	0,69	0,15	0,03	0,04	0
Ndjoy	10	67	30	31	166	705	4,3	0,38	8,5	2,26	0,57	0,12	0,04	0,04	0
Ndjoy	20	77	28	29	313	552	5,2	0,51	15,4	1,86	0,54	0,21	0,08	0,05	0
Ngoko	1	88	55	58	377	423	1,9	0,2	5	1,76	0,25	0,06	0,04	0,09	0
Ngoko	2	28	37	65	359	510	4	0,41	23,6	1,95	0,4	0,15	0,05	0,04	0
Ngoko	3	12	46	76	426	440	3,2	0,37	42	1,15	0,35	0,15	0,05	0,07	0
Ngoko	4	65	43	76	376	440	2,8	0,29	7,7	1,38	0,28	0,12	0,04	0,11	0
Ngoko	5	45	53	65	404	433	3,2	0,3	20,5	1,29	0,34	0,14	0,05	0,06	0
Ngoko	6	32	40	59	407	463	2,8	0,35	15	1,06	0,25	0,09	0,04	0,08	0
Ngoko	7	48	52	80	413	407	3,6	0,37	7,1	1,76	0,34	0,1	0,06	0,08	0
Ngoko	8	42	31	260	180	487	3	0,32	22,5	1,31	0,38	0,14	0,05	0,07	0
Ngoko	10	60	46	68	330	495	3,4	0,33	25	1,59	0,38	0,11	0,05	0,08	0
Tchanar	1	75	35	37	351	502	3,5	0,2	26,5	2,35	0,47	0,15	0,06	0,11	0
Tchanar	2	69	37	33	374	487	3,1	0,38	21,5	1,34	0,36	0,11	0,09	0,13	0
Tchanar	3	177	30	42	388	364	2,7	0,31	6,9	1	0,37	0,09	0,05	0,21	0
Tchanar	4	154	59	61	308	418	3,1	0,33	7,4	0,75	0,26	0,08	0,5	0,13	0,06
Tchanar	5	80	48	51	345	476	2,7	0,35	7,25	0,67	0,2	0,09	0,03	0,19	0
Tchanar	6	117	55	44	306	477	3,4	0,31	8,85	1,5	0,37	0,06	0,04	0,22	0
Tchanar	7	116	58	43	308	474	2,6	0,28	7,1	0,91	0,31	0,05	0,04	0,17	0
Tchanar	8	91	46	67	463	333	3	0,29	8	1,05	0,3	0,05	0,03	0,16	0,01
Tchanar	9	105	37	34	388	435	3,1	0,3	12,25	1,56	0,41	0,17	0,05	0,24	0
Tchanar	10	95	28	39	344	494	2,9	0,28	11,25	1,46	0,38	0,22	0,04	0,21	0
Tchanar	11	131	64	50	265	489	3,8	0,34	10,2	0,88	0,28	0,07	0,04	0,3	0
Tchanar	12	81	42	48	396	432	1,6	0,18	7,35	1	0,26	0,09	0,08	0,2	0
Tchanar	13	114	58	71	402	356	2,2	0,31	12,5	1,04	0,32	0,05	0,04	0,1	0,01
Tchanar	14	76	37	38	393	457	2,6	0,32	9,7	0,52	0,2	0,05	0,04	0,08	0,04
Tchanar	15	127	37	50	290	496	2,9	0,34	22,95	1,22	0,35	0,09	0,03	0,2	0

* Complexe d'échange par la méthode utilisant comme échangeur le chlorure de cobaltihexammine

Annexe I-4 : Caractéristiques physico-chimiques des sols, prélèvements 0-10 cm et 10-20 cm, diagnostic agronomique, Tchad, 1994.

Village	Numéro essai	0-10 cm					10-20 cm							
		CEC* (cmol _c kg ⁻¹)	pH eau	IF** (g 100g ⁻¹)	IP*** (g 100g ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Ca éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Mg éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	K éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Na éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	CEC* (cmol _c kg ⁻¹)	pH eau
Bogoye	1	2,92	6,25	0,32	3,42	2,8	0,27	9	1,69	0,33	0,04	0,04	2,15	6,2
Bogoye	2	4,07	6,45	0,44	4,65	5,4	0,43	32	2,99	0,56	0,09	0,05	3,68	6,45
Bogoye	3	4,41	6,65	0,36	3,59	5,3	0,6	9	3,22	0,76	0,06	0,05	4,06	6,4
Bogoye	6	3,71	6,65	0,36	3,55	4,3	0,45	4,3	2,71	0,59	0,06	0,04	3,41	6,5
Bogoye	7	3,68	6,3	0,46	4,56	5,6	0,53	8	3,01	0,66	0,06	0,05	3,75	6,25
Bogoye	8	3,92	6,3	0,34	3,92	4,9	0,49	6,1	2,7	0,76	0,06	0,05	3,71	6,05
Bogoye	9	3,42	6,5	0,34	3,71	4,1	0,36	5,5	2,38	0,68	0,07	0,05	3,31	6,35
Bogoye	10	4,45	6,8	0,28	3,34	5,3	0,51	9,7	3,69	0,67	0,07	0,09	4,52	6,7
Bogoye	11	4	7	0,31	3,33	5,1	0,4	5,7	2,84	0,5	0,05	0,05	3,52	6,45
Bogoye	12	3,26	6,15	0,23	1,89	3,9	0,3	4,6	1,89	0,64	0,08	0,06	2,72	6
Bogoye	13	2,67	6,5	0,32	3,32	3,9	0,33	4,15	1,86	0,52	0,08	0,04	2,6	6,05
Bogoye	21	3,24	6,45	0,33	3,41	2,9	0,29	10,1	1,95	0,49	0,06	0,06	2,67	6,25
Bogoye	22	3,32	6,85	0,36	3,87	2,8	0,27	13,3	1,95	0,41	0,09	0,05	2,57	6,55
Bogoye	23	2,94	6,35	0,31	2,93	4,2	0,35	4,2	2,46	0,65	0,07	0,05	3,35	6,15
Bogoye	24	2,96	6,25	0,31	3,32	3,5	0,32	11,5	1,76	0,48	0,06	0,04	2,55	6
Donangda	1	2,4	6,4	0,75	7,94	2,5	0,21	14	1	0,26	0,07	0,04	1,38	6,1
Donangda	2	1,82	6,7	0,42	5,16	1,6	0,15	5	0,67	0,23	0,05	0,04	1,02	6,35
Donangda	3	1,87	6,75	0,42	4,64	1,6	0,16	2	1,03	0,28	0,06	0,04	1,34	6,5
Donangda	4	3,6	7,1	0,66	7,54	4,1	0,41	6,7	2,87	0,74	0,17	0,05	3,92	6,75
Donangda	5	2,26	7,05	0,36	4,06	1,8	0,2	11,1	0,9	0,27	0,23	0,03	1,39	6,9
Donangda	9	1,61	6,7	0,24	2,98	1,8	0,14	6,1	0,78	0,22	0,09	0,03	1,21	6,35
Donangda	10	1,99	6,8	0,50	4,98	1,8	0,21	8,6	0,87	0,25	0,06	0,04	1,18	6,2
Donangda	11	1,53	6,8	0,32	3,51	1,3	0,19	9	0,62	0,25	0,11	0,04	1,12	6,6
Donangda	17	1,17	6,2	0,27	3,21	1,6	0,21	4,3	0,62	0,24	0,09	0,09	1,14	6,05
Ndjoy	1	2,4	6,8	0,51	6,30	2,5	0,21	5,7	0,87	0,27	0,12	0,05	1,38	6,4
Ndjoy	2	2,43	6,65	0,55	7,69	2,3	0,25	11,2	0,73	0,37	0,08	0,08	1,11	6,45
Ndjoy	3	1,93	6,45	0,68	8,98	2,1	0,23	14,4	0,46	0,27	0,05	0,05	0,98	5,95
Ndjoy	4	3,09	7,25	0,54	6,80	3,2	0,32	20,6	1,03	0,49	0,11	0,04	1,8	6,4
Ndjoy	5	2,74	7,4	0,49	6,38	2	0,24	13,7	0,94	0,38	0,09	0,04	1,58	6,8

* Complexe d'échange par la méthode utilisant comme échangeur le chlorure de cobaltihexammine. ** Indice de fertilité : C/(Argile + Limon fin). *** Indice de fertilité : CX1.72/(Argile+Limon).

Annexe I-4 (suite).

Village	Numéro essai	0-10 cm					10-20 cm							
		CEC* (cmol _c kg ⁻¹)	pH eau	IF**	IP***	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Ca éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Mg éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	K éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	Na éch.* (cmol _c kg ⁻¹)	CEC* (cmol _c kg ⁻¹)	pH eau
Ndjoy	7	3,46	7,2	0,58	7,16	3	0,24	6	1,26	0,57	0,11	0,05	1,85	6,9
Ndjoy	10	3,02	7,2	0,44	5,78	2,6	0,34	5,45	0,99	0,4	0,08	0,05	1,49	6,7
Ndjoy	20	2,82	6,75	0,50	6,67	3,1	0,35	11,6	1,17	0,42	0,13	0,08	1,91	6,45
Ngoko	1	2,13	6,4	0,13	1,63	3,6	0,34	6,45	1,48	0,32	0,15	0,04	2,06	6,45
Ngoko	2	2,58	6,95	0,62	5,29	3,2	0,27	4,6	2,06	0,41	0,06	0,05	2,62	6,4
Ngoko	3	1,84	6,25	0,55	4,11	2,7	0,27	19	1,26	0,32	0,08	0,05	1,91	5,9
Ngoko	4	2,07	6,6	0,26	2,62	2,1	0,25	9,7	1,23	0,28	0,07	0,04	1,68	6,35
Ngoko	5	1,95	6,55	0,33	3,38	2,2	0,22	6	1,31	0,33	0,06	0,05	1,97	6,05
Ngoko	6	1,69	6,35	0,39	3,68	1,8	0,19	5,4	1,03	0,26	0,06	0,04	1,54	6
Ngoko	7	2,47	6,6	0,36	3,44	2,5	0,21	5,5	1,56	0,37	0,09	0,04	1,91	6,7
Ngoko	8	1,99	6,55	0,41	1,55	1,9	0,22	5	1,2	0,31	0,09	0,05	1,84	6,4
Ngoko	10	2,23	6,4	0,32	3,36	2,3	0,21	5	1,55	0,33	0,06	0,05	2,21	6,1
Tchanar	1	3,06	6,55	0,32	4,10	2,2	0,3	20,7	2,18	0,37	0,08	0,04	2,71	6,85
Tchanar	2	2,05	5,7	0,29	3,84	2,5	0,35	7,6	1,28	0,38	0,07	0,09	2,03	6
Tchanar	3	1,75	5,95	0,13	1,87	2,6	0,35	5,9	1,47	0,48	0,05	0,04	2,54	6,2
Tchanar	4	1,47	5,55	0,15	1,95	2,9	0,36	7,5	1,02	0,33	0,06	0,04	2,23	5,45
Tchanar	5	1,16	6,1	0,21	2,59	1,8	0,26	9	0,61	0,2	0,05	0,04	1,4	5,7
Tchanar	6	2,24	6,4	0,20	2,71	2,2	0,32	5,6	1,01	0,3	0,05	0,04	1,81	5,85
Tchanar	7	1,5	5,9	0,15	2,06	2	0,24	5,8	1,06	0,34	0,06	0,04	2	6,05
Tchanar	8	1,62	5,85	0,22	2,53	2,8	0,33	6,9	1,3	0,41	0,05	0,03	2,34	5,85
Tchanar	9	2,49	6,55	0,22	3,03	1,9	0,31	8,7	1,21	0,36	0,08	0,04	2,17	6,4
Tchanar	10	2,31	6,65	0,24	3,08	2	0,33	7,55	1,15	0,35	0,1	0,06	1,8	6,35
Tchanar	11	1,48	5,65	0,19	2,67	2,3	0,3	6,2	0,75	0,26	0,06	0,06	1,5	5,7
Tchanar	12	1,56	5,8	0,13	1,61	1,6	0,32	7,7	1,08	0,38	0,07	0,03	1,63	6
Tchanar	13	1,58	5,95	0,13	1,56	2,3	0,34	6,7	1,3	0,32	0,04	0,04	1,97	6
Tchanar	14	0,96	5,65	0,23	2,96	2,7	0,33	13,25	0,74	0,28	0,05	0,03	1,75	5,3
Tchanar	15	2,04	6,35	0,18	2,33	2,2	0,3	5,4	0,97	0,35	0,05	0,03	1,68	6,05

* Complexe d'échange par la méthode utilisant comme échangeur le chlorure de cobaltihexammine. ** Indice de fertilité : C/(Argile + Limon fin). *** Indice de fertilité : CX1.72/(Argile+Limon).

Annexe II-1 : niveaux et variations de teneurs en C et N totaux des sols et leurs principales corrélations avec d'autres caractéristiques physico-chimiques du sol et rendements constatés par diagnostic en milieu réel en Afrique sub-saharienne.

Pays - références	Nombre d'observations	Profondeur prélèvement	C total (g.kg ⁻¹)		N total (g.kg ⁻¹)		Principales corrélations ou régressions constatées
			moyenne	variation	moyenne	variation	
Tchad, zone cotonnière (chapitre 1)	57	0-10 cm	4,0	écart-type = 1,4 maximum = 7,3 minimum = 1,6	0,37 0,30	écart-type = 0,10 maximum = 0,61 minimum = 0,18	principales variables présentant une valeur seuil pour la production : C, N, CEC, argile, indice C/(A+Lf), Ca et Mg échangeables, pH CEC = 5,34 C% + 0,009 argile % + 0,30, r ² = 0,76
		10-20 cm	2,8	écart-type = 1,1 maximum = 5,6 minimum = 1,3		écart-type = 0,09 maximum = 0,60 minimum = 0,14	
Tchad, zone cotonnière (Richard et Djoulet, 1985)	79	0-40 cm	4,0	écart-type 1,2	-	-	CEC = 4,66 MO % + 0,06 argile % - 0,97, r ² = 0,92 variabilité des rendements coton expliquée par somme des bases, K échangeable, MO, CEC, argile + limon ; r ² = 0.50
Burkina Faso, village de Thiougou (Taounda, 1995)	18	0-20 cm	-	de 1,7 à 5,2	-	de 0,2 à 0,5	MO = 0,45 + 0,49exp(-0,39 âge parcelle) r ² = 0,6

Annexe II-1 (suite).

Pays - références	Nombre d'observations	Profondeur prélèvement	C total (g.kg ⁻¹)		N total (g.kg ⁻¹)		Principales corrélations ou régressions constatées
			moyenne	variation	moyenne	variation	
République Centrafricaine Bassins Tchad et Oubangui (Richard, 1995)	Bassin Tchad : 57	0-40 cm	8,8	écart-type 2,9	0,67	écart-type 0,2	Corrélations positives entre rendement coton et K échangeable et taux de saturation, négatives entre rendement coton et C, N totaux Corrélations positives entre rendement coton et K, Mg, Ca échangeables, taux de saturation et pH
	Bassin Oubangui : 23	0-40 cm	12,3	écart-type 2,9	0,97	écart-type 0,3	
Burkina Faso, zone de Houndé (Morant, 1991)	59	0-20 cm	7,7	de 3,4 à 13,0	0,70		Corrélation positive entre taux de C et argile, taux de C et Ca échangeable. Corrélations négatives entre taux de C, N, CEC et argile d'une part et âge de la parcelle d'autre-part. $CEC = 6,28 C \% + 0,25 \text{ argile } \% - 2,16, r^2 = 0.56$
Burkina Faso, région Banfora-Sidéradougou (Waneukem, 1995)	31	0-10 cm	6,6	écart-type = 2,4 maximum = 12,4 minimum = 3,2	0,48	écart-type = 0,17 maximum = 0,83 minimum = 0,25	azote minéral avant culture et azote minéralisable (déterminé par incubation de courte durée) les mieux corrélés à l'azote fourni aux plantes
Sénégal, Haute-Casamance (Manlay, 1997)	10	0-10 cm	4,2	écart-type = 1,1	0,27	écart-type = 0,14	Peu de corrélations entre stocks de C et N du sol et durée de jachère ou mode d'exploitation des terres
		10-20 cm	3,0	écart-type = 0,5	0,25	écart-type = 0,14	

Annexe II-2 : Quantités de N, P et K, apportés sur les traitements apports d'engrais et apports de MO sur l'essai B1, Bébédjia, Tchad.

N (kg ha ⁻¹)									
	Engrais minéral (a)	Fumier dose 1		Fumier dose 2		Paille dose 1		Paille dose 2	
		%(a)		%(a)		%(a)		%(a)	
1993	63	35	55	69	110	40	63	79	126
1994	38	23	61	47	122	17	43	33	87
1995	42	24	56	47	113	23	55	46	110
Moyenne		57		114		55		111	

P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)									
	Engrais minéral (a)	Fumier dose 1		Fumier dose 2		Paille dose 1		Paille dose 2	
		%(a)		%(a)		%(a)		%(a)	
1993	18	38	211	76	422	16	90	32	180
1994	24	29	121	58	242	17	69	33	138
1995	12	18	149	36	298	11	88	21	176
Moyenne		157		314		80		161	

K ₂ O (kg ha ⁻¹)									
	Engrais minéral (a)	Fumier dose 1		Fumier dose 2		Paille dose 1		Paille dose 2	
		%(a)		%(a)		%(a)		%(a)	
1993	28,5	46	160	91	320	32	114	65	227
1994	38	54	141	107	282	52	138	105	276
1995	19	45	238	90	476	28	146	56	293
Moyenne		169		338		132		263	

Annexe II-3 : pluviométrie journalière année 1991, station de Bébédjia, Tchad.

Jour	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
1				12,2				66,1	32,5
2						13,5	3,5		
3						17,0	3,5	22,0	
4									
5						5,0			
6				36,6			10,0		7,0
7			7,9			1,5		28,7	
8			0,9		11,6		9,5		
9				0,7	0,6		33,6		
10						15,5			
11			33,6	0,7	6,5		5,6		
12						2,0			
13									
14									
15				21,2		5,5	19,0		
16				7,9	0,6	0,5	65,1		16,1
17								13,2	
18				4,9	1,2	0,5	22,5		
19						4,6			
20				18,0					
21				0,5		1,5	4,0	26,0	
22				14,5	4,5				
23							5,7		12,0
24			0,2		11,3	0,2	0,6		
25			16,4	2,5	0,9	1,0	9,0		
26				35,7			12,0	4,5	0,5
27					43,8	25,1	8,5		23,0
28	9,9			17,1				0,5	
29			2,4						2,1
30				18,5	18,5	1,2	25,5		
31						16,5			
1 ^{ère} décade	0,0	0,0	8,8	49,5	12,2	52,5	60,1	116,8	39,5
2 nd e décade	0,0	0,0	33,6	52,7	8,3	13,1	112,2	13,2	16,1
3 ^{ème} décade	9,9	0,0	19,0	88,8	79,0	45,5	65,3	31,0	37,6
total mensuel	9,9	0,0	61,4	191,0	99,5	111,1	237,6	161,0	93,2
cumul	9,9	9,9	71,3	262,3	361,8	472,9	710,5	871,5	964,7
nombre de jours de pluie	1	0	6	14	10	16	16	7	7

N.B. : aucune pluie n'a eu lieu les mois de janvier, novembre et décembre 1991

Annexe II-4 : pluviométrie journalière année 1992, station de Bébédjia, Tchad.

Jour	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
1				2,7	4,0	2,2			
2					3,0		56,5		0,7
3			0,5	15,0					9,0
4						74,8	3,4		
5									
6					30,2	25,2	46,7		
7			12,8				3,0		
8					32,0	2,8	1,6	12,2	
9			0,5	15,0	8,0		4,0	22,0	
10						30,0			
11						20,0	0,7		
12			4,0					25,0	
13					6,0	19,8	54,5		
14					20,0	17,2			
15			13,0			0,5	8,6		
16				0,5		21,5	9,5		
17	4,1		4,5	5,0	11,5		7,0		
18		26,0				9,5	12,6		
19				35,0	13,5			1,0	
20		4,5	34,8			48,0		0,8	
21					15,0	0,5			
22			12,3				12,7		
23				2,9	0,5	1,5			
24				0,3	9,0	24,0			
25				40,5					
26				11,0	9,8	31,9	0,5		
27						22,0	0,3		
28				46,0				0,5	
29					25,3	76,2			
30			0,5		19,5				
31			0,1			4,5		3,0	
1 ^{ère} décade	0,0	0,0	13,8	32,7	77,2	135,0	115,2	34,2	9,7
2 ^{nde} décade	4,1	30,5	56,3	40,5	51,0	136,5	92,9	26,8	0,0
3 ^{ème} décade	0,0	0,0	12,9	100,7	79,1	160,6	13,5	3,5	0,0
total mensuel	4,1	30,5	83,0	173,9	207,3	432,1	221,6	64,5	9,7
cumul	4,1	34,6	117,6	291,5	498,8	930,9	1152,5	1217,0	1226,7
nombre de jours de pluie	1	2	10	11	15	19	15	7	2

N.B. : aucune pluie n'a eu lieu les mois de janvier, février et décembre 1992

Annexe II-5 : pluviométrie journalière année 1993, station de Bébédjia, Tchad.

Jour	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
1				3,0	23,0	3,2	0,6	13,1	
2				2,6		0,1			0,2
3			1,5			25,0	0,2		
4					14,0			6,5	
5			5,0						
6						0,7	27,8		
7			6,5	0,9	4,5				
8						19,6	25,9	4,3	
9				0,6					
10					5,2	3,5			
11						2,5			
12					57,5				
13						30,5	4,0		
14								0,1	
15							2,0		
16				7,6		47,0			
17				32,3			1,1		
18					8,2	12,5			
19					2,5				
20			18,5		2,2				
21		0,5			12,6	1,3			
22		0,6					17,0		
23				1,3	4,6	8,4			
24		9,1			3,5	0,2		1,3	
25			4,5					8,8	
26					56,0	23,0			
27			4,0						
28		2,2		0,8		20,3	1,8		
29			0,4						
30				8,5	1,8	3,8			
31						0,8			
1 ^{ère} décade	0,0	0,0	13,0	7,1	46,7	52,1	54,5	23,9	0,2
2 ^{nde} décade	0,0	0,0	18,5	39,9	70,4	92,5	7,1	0,1	0,0
3 ^{ème} décade	0,0	12,4	8,9	10,6	78,5	57,8	18,8	10,1	0,0
total mensuel	0,0	12,4	40,4	57,6	195,6	202,4	80,4	34,1	0,2
cumul	0,0	12,4	52,8	110,4	306,0	508,4	588,9	622,9	623,1
nombre de jours de pluie	0	4	7	9	13	17	9	6	1

N.B. : aucune pluie n'a eu lieu les mois de janvier, février et décembre 1993

Annexe II-6 : pluviométrie journalière année 1994, station de Bébédjia, Tchad.

Jour	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
1							35,0		
2				32,6		65,8		7,8	
3			0,7		108,1	13,0			
4				6,3		24,6	95,5		
5		0,9				1,7			
6					4,0	50,8	5,5		
7				2,0	12,0		20,6		
8				30,0	1,0	2,6	35,5		
9				3,2		2,5	9,9		
10					5,5		4,6	1,4	
11		6,3		0,2		51,1			
12					4,7		2,8		
13	29,2		1,2		9,8		0,2	4,0	
14				13,7	2,5		20,4		
15							0,3		
16				1,0	18,0	27,5			
17					34,0	1,3			
18			31,4	18,4		0,8	2,7	0,1	
19					3,1		12,0	13,5	
20									
21					20,4	98,0	1,5		
22		0,4							
23						0,5			
24					26,0		11,7		
25		8,2		10,1	13,8	10,4			
26			2,1			2,0	8,6		
27									
28		1,8	1,5		53,0	55,8	25,7		
29				2,3					
30				7,0	7,6	33,3			
31					28,3				
1 ^{ère} décade	0,0	0,9	0,7	74,1	130,6	161,0	206,6	9,2	0,0
2 ^{ème} décade	29,2	6,3	32,6	33,3	72,1	38,4	17,6	0,0	0,0
3 ^{ème} décade	0,0	10,4	3,6	19,4	149,1	200,0	47,5	0,0	0,0
total mensuel	29,2	17,6	36,9	126,8	351,8	441,7	292,5	26,8	0,0
cumul	29,2	46,8	83,7	210,5	562,3	1004,0	1296,5	1323,3	1323,3
nombre de jours de pluie	1	5	5	12	17	17	17	5	0

N.B. : aucune pluie n'a eu lieu les mois de janvier, février et décembre 1994

Annexe II-7 : profil pédologique de sol beige, station de Bébédjia, Tchad.

Description

0-16 cm	Humifère lessivé gris clair 10 YR 5/2 - 4/2 ; sableux ; structure polyédrique grossier faiblement développé, peu dur, peu poreux ; pas de sous-structure.
16-30 cm	Passage distinct à horizon lessivé très peu humifère, gris rose 7,5 YR 5,5/2 - 4/2 ; sableux polyédrique grossier, plus grossier assemblage massif peu dur, assez poreux.
30-45 cm	Brun clair 7,5 YR 6/3 - 5/4 ; même structure plus développée, poreux suivant un réseau clair.
45-64 cm	Brun clair 7,5 YR 6/4 - 8,5 YR 6/4 ; polyédrique moyen, moyennement développé ; poreux autour des agrégats, un peu dur.
64-80 cm	Horizon de transition : assemblage de zones brun rouge 5 YR 5/4 - 5/4 ; trainées correspondant à l'horizon précédent ; structure polyédrique moyenne assez bien développée et assez dure.
80-160 cm	Horizon d'accumulation diffus 5 YR 5/6 - 5/6 ; argileux polyédrique moyen, engrené, moyennement développé, dur, assez poreux, tubulaire fin.

Fiche analytique

Profondeur	0 - 10 cm	30 - 40 cm	90 - 100 cm
Humidité %	0,2	0,3	1,1
Argile %	2,2	6,2	30,2
Limon fin %	2,2	2,5	2,7
Limon grossier %	3,1	2,9	2,1
Sable fin %	19,2	17,5	8,2
Sable grossier %	72,2	70,2	56,3
Carbone (g kg ⁻¹ sol)	5,0	1,5	1,8
Phosphore assimilable Olsen (mg kg ⁻¹ sol)	43	33	-
Calcium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	1,6	0,6	0,6
Magnésium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	-	-	0,5
Potassium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	0,20	0,6	0,08
Sodium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	0,04	0,02	0,02
CEC (cmol _c kg ⁻¹ sol)	4,0	1,5	3,0
V %	45	46	47
pH eau	6,1	5,5	4,8
pH KCl	5,5	4,7	4,1
Indice instabilité structurale	0,27	1,0	1,6
Imperméabilité K cm h ⁻¹	1,4	1,1	1,5

Sources : Mégie et Bourcy, 1974.

Annexe II-8 : caractéristiques physico-chimiques initiales des sols des essais B1 et B4, Bébédjia, Tchad et G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, prélèvement 0-20 cm.

	B1	B4	G
Argile %	7,5	4,9	26
Limon fin %	2,9	4,6	4
Limon grossier %	4,0	4,3	4
Sable fin %	22,4	19,0	30
Sable grossier %	63,2	67,2	35
Carbone (g kg ⁻¹ sol)	6,0	2,6	10,8
Azote total (g kg ⁻¹ sol)	0,54	0,26	1,07
Phosphore assimilable Olsen (mg kg ⁻¹ sol)	105	19	-
Calcium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	3,6	1,04	3,2
Magnésium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	0,51	0,18	0,53
Potassium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	0,20	0,08	0,14
Sodium échangeable (cmol _c kg ⁻¹ sol)	0,03	0,03	0,02
CEC (cmol _c kg ⁻¹ sol)	4,30	1,43	5,80
pH eau	6,7	7,5	5,5

Essai B1 : moyenne des témoins sans apports après une année de culture. Essais B4 et G : résultats d'analyse de sols avant mise en culture.

Annexe II-9 : opérations culturales sur l'essai B1, station de Bébédjia, Tchad.

	1993	1994
Culture	cotonnier	maïs
Variété	Irma 9697	Cms8507C1
Apport matières organiques*	12 au 15/06	31/05 au 07/06
Labour	18/06	24/05
Semis	26/06	09/06
Distance interligne (m)	1	1
Distance interpoquets (cm)	25	25
Densité visée (plants.ha ⁻¹)	40 000	40 000
Levée	06/07	n.o.
Ressemis	09/07	21/06 et 27/06
Epandage engrais complet en side dressing	09/07	28/06
Sarclage	09/07	24/06
Démariage 1 plant	19/07	06/07
Sarclage	26/07	14/07
Epandage urée	27/07	-
Buttage	13/08	08/08
Protection phytosanitaire	10 traitements	-

*selon le profil pluviométrique de début de campagne, il est procédé soit à un labour de la parcelle suivi des enfouissements manuels de matière organique (et une reprise manuelle de labour sur les parcelles ne recevant pas de matière organique), soit à des enfouissements manuels de matière organique suivi d'un labour général de l'essai. Le mulch de maïs est épandu après le labour. n.o. : non observé.

Annexe II-10 : opérations culturales sur l'essai B4, station de Bébédjia, Tchad).

	1991	1992	1993	1994
Culture	cotonnier	maïs	cotonnier	maïs
Variété	Irma 9697	Cms8507 C1	Stam F	Cms8507C1
Apport matières organiques*	03 au 09/05	11 au 20/05	15/04 au 06/05	11 au 23/05
Labour	05/06	02/06	04/06	24/05
Semis	07/06	05/06	11/06	03/06
Distance interligne (m)	1	1	1	1
Distance interpoquets (cm)	25	25	25	25
Densité visée (plants.ha ⁻¹)	40 000	40 000	40 000	40 000
Levée	14/06	13/06	22/06	n.o.
Ressemis	29/06 et 12/07	19/06	01/07 et 19/07	15/06
Epandage engrais complet	05/07	26/06	08/07	28/06
Sarclages	11/07 et 08/08	26/06 et 25/07	08/07, 22/07, 21/08 et 20/09	20/06 et 20/09
Démariage 1 plant	11/07	26/06	05/07	30/06
Epandage urée	30/06	25/06	22/07	30/06
Buttage	-	-	-	18/08
Protection phytosanitaire	10 traitements	-	10 traitements	-
Première récolte	22/11	05/10	15/10	28/09
Seconde récolte	12/12	-	07/11	-

*selon le profil pluviométrique de début de campagne, il est procédé soit à un labour de la parcelle suivi des enfouissements manuels de matière organique (et une reprise manuelle de labour sur les parcelles ne recevant pas de matière organique), soit à des enfouissements manuels de matière organique suivi d'un labour général de l'essai. Le mulch de maïs est épandu après le labour. n.o. : non observé.

Annexe II-11 : teneurs en éléments minéraux des différentes matières organiques produites et utilisées sur les essais B4 et B1 de 1991 à 1995, station de Bébédjia, Tchad.

Terre de parc : déjections d'animaux parqués pendant la saison sèche, sans apport de paille.

Années	Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)							
	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	CaO	MgO	SiO ₂
1991	14,6	0,85	0,19	0,38	0,03	0,27	0,18	
1992	25,1	1,43	1,39	2,38		0,42	0,87	
1993	5,6	0,53	0,50	0,43		1,02	0,36	65
1994	14,5	0,89	0,46	1,36		0,89	0,46	61
1995	8,0	0,71	0,38	1,05	0,09	0,84	0,35	56

Fumier d'étable : fumier fabriqué en stabulation avec fosse, en saison sèche, avec paillage régulier (paille de jachère) et sans arrosage.

Années	Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)							
	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	CaO	MgO	SiO ₂
1991	25,7	1,66	0,43	0,81	0,02	0,78	0,30	
1992	18,3	1,47	1,33	1,96		0,46	0,82	
1993	23,2	1,55	0,95	1,14		2,17	0,68	52
1994	11,6	0,87	1,16	2,14		1,79	0,77	41
1995	21,3	1,58	1,05	2,66	0,18	2,07	0,81	41

Compost : résidus de battage des vivriers compostés en fosses en saison sèche avec ajout au départ de déjections d'animaux, arrosages et retournement pour aération.

Années	Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)							
	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	CaO	MgO	SiO ₂
1991	8,9	0,79	0,24	0,24	0,05	0,37	0,14	
1992	9,0	0,91	0,93	0,66		0,31	0,57	
1993	4,6	0,41	0,49	0,66		1,20	0,37	68
1994	9,9	1,02	0,68	1,04		1,20	0,49	55
1995	8,4	0,86	0,63	0,93	0,1	1,21	0,49	64

Fumier de parc : transformation des pailles de sorgho par piétinement, incorporation de déjections d'animaux en saison sèche et compostage en l'état pendant une saison des pluies (Berger, 1996).

Années	Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)							
	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	CaO	MgO	SiO ₂
1991	20,0	2,03	0,51	0,36	0,04	0,69	0,38	
1992	18,9	2,13	2,08	2,76		0,64	1,38	
1993	18,6	1,89	1,66	2,95		2,77	1,08	28
1994	28,5	2,96	2,20	3,63		2,98	1,57	28
1995	25,1	2,45	1,74	5,27	0,32	1,11	1,62	22

Paille de jachère.

Années	Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)							
	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	CaO	MgO	SiO ₂
1993	36,5	0,66	0,27	0,54	0,32	0,76	0,25	2,8
1994	45,1	0,66	0,33	1,05		0,58	0,22	3,8

Tourteaux de coton (d'après le rapport annuel 1988/1989 de la station de Bébédjia, section agronomie).

Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)		
N	P ₂ O ₅	K ₂ O
7	2	2

Paille de maïs (d'après les données de l'essai G de Gagnoa, Côte d'Ivoire, non publiées).

Années	Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
1973	0,75	0,13	2,38	0,48	0,29
1974	0,42	0,14	1,98	0,32	0,20
1975	0,67	0,17	2,33	0,34	0,22
1976	0,76	0,35	2,26	0,66	0,17

Annexe II-12 : teneurs en éléments minéraux du compost utilisés sur l'essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire.

Années	Teneurs (g 100g ⁻¹ matière organique)						
	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	CaO	MgO
1973	29,3	2,40	1,65	2,23	0,5	3,01	1,50
1975	n.d.	1,96	0,97	8,93	n.d.	1,90	1,17
1975	n.d.	2,22	0,92	10,32	n.d.	1,50	0,99
1986	n.d.	1,38	0,38	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1986	n.d.	1,12	0,43	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1986	n.d.	1.82	0,37	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d. : non déterminé.

D'après Gigou, communication personnelle.

Annexe II-13 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha⁻¹) - année 1993 - Essai B1, Bébédjia, Tchad.

Facteur 1 : nature et quantité d'apport organique	Facteur 2 : existence et type des apports			Moyenne essai
	Apport organique	Témoin adjacent apport engrais minéral	Témoin adjacent aucun apport	
Fumier dose 1	1778	2056	1495	
Fumier dose 2	1903	2256	1523	
Paille dose 1	1339	2042	1392	
Paille dose 2	1369	2264	1471	
Moyenne facteur 2	1597 b	2155 a	1471 b	1741
Effet facteur 2	H.S.	F = 42	ETR = 318	CV = 18%
Effet interaction F1XF2	N.S.	F = 2,0		
Contraste 1 entre fumiers et pailles			S.	F = 6,6
Contraste 2 entre doses de fumier			N.S.	F = 0,7
Contraste 3 entre doses de paille			N.S.	F = 0,8

H.S. : différence significative à $p < 0,01$; S. : différence significative à $p < 0,05$; N.S. : différence non significative à $p < 0,05$. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$.

Annexe II-14 : analyses statistiques du rendement en maïs-grain (kg ha⁻¹) - année 1994 - Essai B1, Bébédjia, Tchad.

Facteur 1 : nature et quantité d'apport organique	Facteur 2 : existence et type des apports			Moyenne essai
	Apport organique	Témoin adjacent apport engrais minéral	Témoin adjacent aucun apport	
Fumier dose 1	1738 a	1988 a	1445 a	
Fumier dose 2	2355 a	2364 a	1109 b	
Paille dose 1	1312 a	1795 a	1415 a	
Paille dose 2	1188 b	2020 a	1485 ab	
Moyenne facteur 2	1648 b	2042 a	1363 b	1684
Effet facteur 2	H.S.	F = 9,6	ETR = 620	CV = 37%
Effet interaction F1XF2	S.	F = 2,6		
Contraste 1 entre fumiers et pailles			H.S.	F = 9,8
Contraste 2 entre doses de fumier			S.	F = 4,7
Contraste 3 entre doses de paille			N.S.	F = 0,2

H.S. : différence significative à $p < 0,01$; S. : différence significative à $p < 0,05$; N.S. : différence non significative à $p < 0,05$. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$. Test de Newman-keuls sur l'interaction F1XF2 réalisé pour chaque traitement F1.

Annexe II-15 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha⁻¹) - année 1995 - Essai B1, Bébédjia, Tchad.

Facteur 1 : nature et quantité d'apport organique	Facteur 2 : existence et type des apports			Moyenne essai
	Apport organique	Témoin adjacent apport engrais minéral	Témoin adjacent aucun apport	
Fumier dose 1	1470	1527	1030	
Fumier dose 2	1580	1763	803	
Paille dose 1	1202	1278	936	
Paille dose 2	1045	1516	1066	
Moyenne facteur 2	1324 b	1521 a	959 c	1268
Effet facteur 2	H.S.	F = 18,1	ETR = 648	CV = 30%
Effet interaction F1XF2	N.S.	F = 2,1		
Contraste 1 entre fumiers et pailles			S.	F = 6,6
Contraste 2 entre doses de fumier			N.S.	F = 1,6
Contraste 3 entre doses de paille			N.S.	F = 1,1

H.S. : différence significative à $p < 0,01$; S. : différence significative à $p < 0,05$; N.S. : différence non significative à $p < 0,05$. Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$.

Annexe II-16 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha⁻¹) - année 1991 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.

F2 Types matière organique	F3 Modalités organo-minérales				
	Témoin	Apport organique	Apport organique + urée		
paille de jachère	951	1450	893		
tige de maïs	1034	1290	1345		
mulch de maïs	1066	763	925		
compost	835 b	1905 a	1693 a		
terre de parc	783 b	1413 a	1371 a		
fumier d'étable	1431 b	2162 a	2078 a		
fumier de parc	823 c	1609 b	2204 a		
tourteau coton	1530	1567	1221		
Moyenne F3	1057 b	1520 a	1466 a	Moyenne essai	1348
Effet grandes parcelles F2 : N.S.		Effet petites parcelles F3 : H.S. F1XF3 : H.S.			
CV = 77%		CV = 32%			

N.B. : en 1991, le facteur F1, fréquence d'apport, avec les niveaux apport annuel et apport un an sur deux n'est pas mis en place : seul le niveau apport annuel existe. H.S. : différence significative à $p < 0,01$; N.S. : différence non significative à $p < 0,05$. Les moyennes suivies d'aucune lettre ou suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$. Test de Newman-keuls sur l'interaction F2XF3 réalisé pour chaque traitement F2.

Annexe II-17 : analyses statistiques du rendement en maïs grain (kg ha⁻¹) - année 1992 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.

F1 Fréquence des apports	F2 Types matière organique	F3 Modalités organo-minérales			Moyenne F1XF2	Moyenne F1
		Témoin	Apport organique	Apport organique + urée		
Epannage annuel	paille de jachère	269	322	282	291 d	1442 a
	tige de maïs	685	697	890	757 cd	
	mulch de maïs	190	394	497	360 d	
	compost	582 b	1161 a	2161 a	1301 bc	
	terre de parc	292 c	1690 b	3475 a	1818 b	
	fumier d'étable	656 c	2118 b	3021 a	1932 b	
	fumier de parc	377 c	1680 b	2885 a	1647 b	
	tourteau coton	630 b	4513 b	5132 a	3425 a	
Moyenne F1XF3		460 c	1572 b	2293 a		
Epannage un an sur deux	paille de jachère	656	507	1082	748 b	584 b
	tige de maïs	82	82	449	205 b	
	mulch de maïs	209	213	513	312 b	
	compost	44	542	590	392 b	
	terre de parc	30	59	380	156 b	
	fumier d'étable	521 b	554 b	1711 a	928 b	
	fumier de parc	125	347	299	257 b	
	tourteau coton	547 b	2313 a	2160 a	1674 a	
Moyenne F1XF3		276 b	577 b	898a		
Moyenne F2XF3	paille de jachère	463	414	682	Moyenne F2	520 cd
	tige de maïs	384	390	669		481 cd
	mulch de maïs	199	304	505		336 d
	compost	313 b	851 ab	1375 a		847 cd
	terre de parc	161 c	874 b	1928 a		988 bc
	fumier d'étable	588 c	1336 b	2366 a		1430 b
	fumier de parc	251 b	1013 a	1592 a		952 bc
	tourteau coton	588 b	3413 a	3646 a		2549 a
Moyenne F3		368 c	1075 b	1595 a	Moyenne essai	1013
Effet grandes parcelles F1 : H.S. F = 104 ETR = 504 CV = 50%		Effet parcelles intermédiaires F2 : H.S. F = 26 F1XF2 : H.S. F = 8 ETR = 597 CV = 59%		Effet petites parcelles F3 : H.S. F = 64 F1XF3 : H.S. F = 16 F2XF3 : H.S. F = 7 F1XF2XF3 : H.S. F = 3 ETR = 597 CV = 59%		

H.S. : différence significative à $p < 0,01$. Les moyennes suivies d'aucune lettre ou suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$. Tests de Newman-keuls sur les interactions F1XF2 et F1XF3 réalisés pour chaque traitement F1. Test de Newman-keuls sur l'interaction F2XF3 réalisé pour chaque traitement F2. Test de Newman-keuls sur l'interaction F1XF2XF3 réalisé pour chaque traitement F1X2.

Annexe II-18 : analyses statistiques du rendement en coton-graine (kg ha⁻¹) - année 1993 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.

F1 Fréquence des apports	F2 Types matière organique	F3 Modalités organo-minérales			Moyenne F1XF2	Moyenne F1
		Témoin	Apport organique	Apport organique + urée		
Epannage annuel	paille de jachère	544	919	505	656	1297
	tige de maïs	1229	1519	1452	1400	
	mulch de maïs	1071	1210	933	1071	
	compost	1033	1471	1533	1346	
	terre de parc	695	1462	1810	1322	
	fumier d'étable	1681	2386	2519	2195	
	fumier de parc	657	1676	2205	1513	
	tourteau coton	1519	729	367	871	
Moyenne F1XF3		1054	1421	1415		
Epannage un an sur deux	paille de jachère	874	1058	1242	1058	889
	tige de maïs	519	157	181	286	
	mulch de maïs	924	800	567	763	
	compost	738	1400	1124	1087	
	terre de parc	452	857	743	684	
	fumier d'étable	781	1514	938	1078	
	fumier de parc	371	1452	990	938	
	tourteau coton	1524	1490	643	1219	
Moyenne F1XF3		773	1091	803		
Moyenne F2XF3	paille de jachère	709	989	873	Moyenne F2	857
	tige de maïs	874	838	817		843
	mulch de maïs	998	1005	750		917
	compost	886	1436	1329		1217
	terre de parc	574	1160	1276		1003
	fumier d'étable	1231	1950	1729		1637
	fumier de parc	514	1564	1598		1225
	tourteau coton	1521 a	1110 a	505 b		1045
Moyenne F3		368 c	1075 b	1595 a	Moyenne essai	1013
Effet grandes parcelles F1 : N.S. F = 6 ETR = 1039 CV = 95%		Effet parcelles intermédiaires F2 : N.S. F = 2 F1XF2 : N.S. F = 2 ETR = 823 CV = 75%		Effet petites parcelles F3 : H.S. F = 8 F1XF3 : N.S. F = 2 F2XF3 : H.S. F = 4 F1XF2XF3 : N.S. F = 1 ETR = 427 CV = 39%		

H.S. : différence significative à $p < 0,01$. N.S. : différence non significative à $p < 0,05$. Les moyennes suivies d'aucune lettre ou suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$. Test de Newman-keuls sur l'interaction F2XF3 réalisé pour chaque traitement F2.

Annexe II-19 : analyses statistiques du rendement en maïs grain (kg ha⁻¹) - année 1994 - Essai B4, Bébédjia, Tchad.

F1 Fréquence des apports	F2 Types matière organique	F3 Modalités organo-minérales			Moyenne F1XF2	Moyenne F1
		Témoin	Apport organique	Apport organique + urée		
Epannage annuel	paille de jachère	322	578	862	587	1145 a
	tige de maïs	938	1038	1207	1061	
	mulch de maïs	331	700	774	602	
	compost	279	564	1352	732	
	terre de parc	360	762	1767	963	
	fumier d'étable	717	1769	2579	1688	
	fumier de parc	760	1633	2398	1597	
	tourteau coton	955	2400	2445	1933	
Moyenne F1XF3		582	1181	1673		
Epannage un an sur deux	paille de jachère	672	925	1492	Moyenne F2	918 b
	tige de maïs	290	362	1131		
	mulch de maïs	272	732	1293		
	compost	203	881	967		
	terre de parc	48	210	1052		
	fumier d'étable	555	952	1990		
	fumier de parc	98	1167	1671		
	tourteau coton	617	2209	2250		
Moyenne F1XF3		344	930	1481		
Moyenne F2XF3	paille de jachère	497 b	751 ab	1177 a	Moyenne F2	808 cd
	tige de maïs	614 a	700 a	1169 a		828 cd
	mulch de maïs	301 b	716 ab	1033 a		684 d
	compost	241 b	723 ab	1160 a		708 d
	terre de parc	204 b	486 b	1410 a		700 d
	fumier d'étable	636 c	1361 b	2284 a		1427 ab
	fumier de parc	429 c	1400 b	2034 a		1288 bc
	tourteau coton	786 b	2305 a	2348 a		1813 a
Moyenne F3		463 c	1055 b	1577 a	Moyenne essai	1032
Effet grandes parcelles F1 : S. F = 28 ETR = 259 CV = 25%		Effet parcelles intermédiaires F2 : H.S. F = 9 F1XF2 : N.S. F = 2 ETR = 585 CV = 57%		Effet petites parcelles F3 : H.S. F = 76 F1XF3 : N.S. F = 0 F2XF3 : H.S. F = 3 F1XF2XF3 : N.S. F = 1 ETR = 442 CV = 43%		

H.S. : différence significative à $p < 0,01$. S. : différence significative à $p < 0,05$. N.S. : différence non significative à $p < 0,05$. Les moyennes suivies d'aucune lettre ou suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de Newman-Keuls à $p < 0,05$. Test de Newman-keuls sur l'interaction F2XF3 réalisé pour chaque traitement F2.

Annexe III-1 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Tableau 11 : Résultats des fractionnements, total C, total N, total C/N										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Témoin 1-a	200-2000 µm	639	648	0,50	0,32	61	0,042	0,027	58	12
	50-200 µm	216	205	1,61	0,33	62	0,120	0,025	52	13
	20-50 µm	25	31	4,11	0,13	24	0,472	0,014	30	9
	2-20 µm	30	51	35,40	1,82	340	2,054	0,105	222	17
	0-2 µm	91	63	41,45	2,62	491	3,242	0,205	433	13
	Fraction organique soluble				0,30	56		0,047	100	6
	N minéral							0,016	33	
	Somme fractions		998		5,52	1033		0,440	929	
	Sol non fractionné			5,34			0,473			11

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-2 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Annexe 11-2 : Résultats des fractionnements, Essai D1, D200µm, 100µm.										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoins 1-b	200-2000 µm	639	660	0,30	0,20	38	0,041	0,027	63	7
	50-200 µm	216	199	1,30	0,26	49	0,098	0,020	46	13
	20-50 µm	25	30	3,31	0,10	19	0,482	0,015	34	7
	2-20 µm	30	43	34,09	1,48	283	1,279	0,056	130	27
	0-2 µm	91	66	40,14	2,64	504	3,322	0,218	510	12
	Fraction organique soluble				0,28	53		0,035	81	8
	N minéral							0,015	35	
	Somme fractions		998		4,95	946		0,385	899	
	Sol non fractionné			5,24			0,428			12

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-3 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Annexe III-5 : Résultats des fractionnements, essai D1, Decap, Tenac.										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Témoin 2-a	200-2000 µm	693	735	0,65	0,48	81	0,059	0,043	122	11
	50-200 µm	173	125	3,21	0,40	68	0,216	0,027	76	15
	20-50 µm	38	35	12,22	0,43	73	0,801	0,028	79	15
	2-20 µm	30	48	40,37	1,94	331	2,219	0,107	300	18
	0-2 µm	66	58	38,57	2,24	382	2,675	0,156	437	14
	Fraction organique soluble				0,20	34		0,043	121	5
	N minéral							0,010	29	
	Somme fractions		1002		5,70	970		0,414	1166	
Sol non fractionné				5,88			0,356			17

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-4 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 2-b	200-2000 µm	693	749	0,80	0,60	102	0,056	0,042	113	14
	50-200 µm	173	110	4,01	0,44	75	0,242	0,027	73	17
	20-50 µm	38	36	11,52	0,42	71	0,766	0,028	75	15
	2-20 µm	30	46	39,77	1,83	312	2,049	0,094	256	19
	0-2 µm	66	57	39,67	2,27	386	2,730	0,156	423	15
	Fraction organique soluble				0,22	38		0,044	120	5
	N minéral							0,023	63	
	Somme fractions		998		5,78	984		0,414	1123	
	Sol non fractionné			5,88			0,369			16

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-5 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Annexe 11-5 : Résultats des fractionnements, Essai 11, 2000µm, 1000µm										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport fumier 1-a	200-2000 µm	660	729	1,16	0,84	142	0,032	0,023	51	36
	50-200 µm	199	127	4,62	0,59	98	0,281	0,036	78	16
	20-50 µm	28	27	5,53	0,15	25	0,472	0,013	28	12
	2-20 µm	42	56	43,71	2,45	413	1,846	0,104	226	24
	0-2 µm	72	62	39,69	2,46	414	2,904	0,180	393	14
	Fraction organique soluble				0,18	31		0,024	53	8
	N minéral							0,019	41	
	Somme fractions		1001		6,68	1123		0,399	869	
	Sol non fractionné			5,95			0,459			13

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-6 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Apport fumier 1-b	200-2000 µm	660	669	0,85	0,57	91	0,018	0,012	26	47
	50-200 µm	199	181	3,72	0,67	107	0,249	0,045	96	15
	20-50 µm	28	29	5,22	0,15	24	0,311	0,009	19	17
	2-20 µm	42	56	43,33	2,43	388	2,287	0,128	272	19
	0-2 µm	72	66	39,59	2,63	421	2,924	0,194	412	14
	Fraction organique soluble				0,21	33		0,029	63	7
	N minéral							0,021	44	
	Somme fractions		1001		6,65	1064		0,439	931	
	Sol non fractionné			6,25			0,471			13

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-7 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportio n N sol (g kg ⁻¹)	
Apport fumier 2-a	200-2000 µm	638	735	1,00	0,74	114	0,075	0,055	113	13
	50-200 µm	218	112	4,31	0,48	75	0,296	0,033	68	15
	20-50 µm	37	36	14,15	0,51	79	1,028	0,037	76	14
	2-20 µm	30	44	40,73	1,80	277	2,087	0,092	189	20
	0-2 µm	77	71	36,92	2,63	405	2,493	0,177	365	15
	Fraction organique soluble				0,26	40		0,044	91	6
	N minéral							0,024	50	
	Somme fractions		998		6,42	989		0,464	952	
	Sol non fractionné			6,49			0,487			13

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-8 : Résultats des fractionnements, essai B1, Bébédjia, Tchad.

Tableau 11-3 : Résultats des fractionnements, Essai 2-1, 2000-01, 1000 g										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport fumier 2-b	200-2000 µm	638	758	1,00	0,76	117	0,075	0,057	125	13
	50-200 µm	218	97	4,31	0,42	65	0,318	0,031	68	14
	20-50 µm	37	31	12,79	0,40	61	0,772	0,024	52	17
	2-20 µm	30	43	43,54	1,88	289	2,212	0,095	208	20
	0-2 µm	77	70	36,52	2,56	395	2,643	0,185	405	14
	Fraction organique soluble				0,27	41		0,048	105	6
	N minéral							0,015	32	
	Somme fractions		999		6,28	968		0,456	996	
	Sol non fractionné			6,49			0,458			14

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-9 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 1-a	200-2000 µm	784	726	0,27	0,20	70	0,000	0,000	1	112 9
	50-200 µm	119	137	1,08	0,15	53	0,069	0,009	47	16
	20-50 µm	23	30	2,26	0,07	24	0,152	0,005	22	15
	2-20 µm	33	53	15,05	0,80	282	0,670	0,035	174	22
	0-2 µm	41	50	26,90	1,34	474	1,951	0,097	477	14
	Fraction organique soluble				0,19	68		0,030	147	6
	N minéral							0,011	53	
	Somme fractions		996		2,74	971		0,187	921	
	Sol non fractionné			2,82			0,204			14

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-10 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Annexe III 10 : Résultats des fractionnements, Essai D-1, Descaja, Pondé.										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destructio n matière organique	Sans destructio n matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportio n C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Témoin 1-b	200-2000 µm	784	695	0,28	0,19	68	0,000	0,000	1	123 1
	50-200 µm	119	159	0,99	0,16	56	0,068	0,011	53	15
	20-50 µm	23	35	2,93	0,10	37	0,185	0,007	32	16
	2-20 µm	33	55	13,88	0,76	268	0,617	0,034	165	23
	0-2 µm	41	52	27,60	1,43	506	1,975	0,102	503	14
	Fraction organique soluble				0,23	83		0,026	127	9
	N minéral							0,010	49	
	Somme fractions		996		2,87	1017		0,189	929	
	Sol non fractionné				2,82			0,204		14

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-11 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 2-a	200-2000 µm	692	739	0,15	0,11	43	0,023	0,017	88	7
	50-200 µm	188	142	1,17	0,17	65	0,092	0,013	68	13
	20-50 µm	35	26	6,61	0,17	67	0,491	0,013	66	13
	2-20 µm	27	35	19,83	0,70	272	1,277	0,045	232	16
	0-2 µm	59	57	24,74	1,41	552	1,853	0,106	548	13
	Fraction organique soluble				0,18	70		0,030	156	6
	N minéral							0,004	18	
	Somme fractions		999		2,74	1069		0,227	1176	
	Sol non fractionné			2,56			0,193			13

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-12 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 2-b	200-2000 µm	692	760	0,25	0,19	74	0,026	0,019	101	10
	50-200 µm	188	114	1,35	0,15	60	0,103	0,012	61	13
	20-50 µm	35	30	4,96	0,15	58	0,386	0,012	60	13
	2-20 µm	27	38	18,23	0,69	271	1,142	0,043	225	16
	0-2 µm	59	55	24,24	1,34	522	1,788	0,098	510	14
	Fraction organique soluble				0,17	67		0,030	155	6
	N minéral							0,026	134	
	Somme fractions		997		2,69	1053		0,240	1245	
	Sol non fractionné			2,56			0,193			13

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-13 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Annexe III 15 : Résultats des fractionnements, Essai 2-1, Deceja, Tchad.										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Apport fumier 1-a	200-2000 µm	744	724	0,46	0,33	110	0,031	0,022	90	15
	50-200 µm	174	162	1,45	0,24	79	0,135	0,022	89	11
	20-50 µm	25	31	3,23	0,10	33	0,237	0,007	29	14
	2-20 µm	25	43	13,48	0,58	193	0,744	0,032	129	18
	0-2 µm	33	40	35,37	1,41	469	2,456	0,098	394	14
	Fraction organique soluble				0,24	79		0,030	123	8
	N minéral							0,010	40	
	Somme fractions		999		2,89	961		0,222	893	
	Sol non fractionné			3,00			0,248			12

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-14 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Apport fumier 1-b	200-2000 µm	744	710	0,32	0,23	71	0,034	0,024	93	9
	50-200 µm	174	172	1,70	0,29	92	0,166	0,029	110	10
	20-50 µm	25	32	3,04	0,10	31	0,233	0,008	29	13
	2-20 µm	25	44	13,57	0,60	186	0,736	0,032	123	18
	0-2 µm	33	40	36,79	1,49	465	2,749	0,111	426	13
	Fraction organique soluble				0,21	66		0,029	110	7
	N minéral							0,012	47	
	Somme fractions		999		2,92	911		0,245	937	
	Sol non fractionné			3,20			0,261			12

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-15 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol(g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Apport fumier 2-a	200-2000 µm	649	784	0,35	0,27	95	0,043	0,034	143	8
	50-200 µm	216	90	2,60	0,23	81	0,232	0,021	89	11
	20-50 µm	41	29	7,01	0,20	70	0,641	0,019	79	11
	2-20 µm	36	43	17,43	0,75	258	1,312	0,056	239	13
	0-2 µm	57	53	24,94	1,32	455	2,053	0,109	461	12
	Fraction organique soluble				0,22	75		0,059	249	4
	N minéral							0,010	42	
	Somme fractions		999		3,01	1033		0,308	1303	
	Sol non fractionné			2,91			0,236			12

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-16 : Résultats des fractionnements, essai B4, Bébédjia, Tchad.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Apport fumier 2-b	200-2000 µm	649	766	0,40	0,31	106	0,038	0,029	122	11
	50-200 µm	216	109	2,10	0,23	79	0,172	0,019	80	12
	20-50 µm	41	30	6,51	0,20	67	0,561	0,017	71	12
	2-20 µm	36	41	17,13	0,70	242	1,247	0,051	217	14
	0-2 µm	57	52	24,84	1,29	445	2,133	0,111	470	12
	Fraction organique soluble				0,21	71		0,048	203	4
	N minéral							0,002	6	
	Somme fractions		998		2,94	1009		0,276	1169	
	Sol non fractionné			2,91			0,236			12

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-17 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 1-a	200-2000 µm	468	392	1,32	0,52	56	0,027	0,011	11	49
	50-200 µm	212	224	1,83	0,41	45	0,159	0,036	38	12
	20-50 µm	46	30	11,53	0,35	38	0,680	0,021	22	17
	2-20 µm	30	74	19,26	1,43	157	1,542	0,115	123	12
	0-2 µm	243	273	16,03	4,38	478	1,855	0,507	542	9
	Fraction organique soluble				0,87	95		0,084	90	10
	N minéral							0,071	76	
	Somme fractions		994		7,96	869		0,844	902	
	Sol non fractionné			9,16			0,935			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-18 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 1-b	200-2000 µm	468	385	1,24	0,48	52	0,095	0,036	39	13
	50-200 µm	212	240	2,50	0,60	66	0,186	0,045	48	13
	20-50 µm	46	22	7,19	0,16	18	0,453	0,010	11	16
	2-20 µm	30	74	19,18	1,41	154	1,527	0,112	120	13
	0-2 µm	243	277	16,20	4,48	489	1,868	0,517	553	9
	Fraction organique soluble				0,91	99		0,095	102	10
	N minéral							0,073	78	
	Somme fractions		998		8,04	878		0,889	950	
	Sol non fractionné			9,16			0,935			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-19 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 2-a	200-2000 µm	209	210	1,92	0,40	47	0,167	0,035	41	11
	50-200 µm	36	41	11,10	0,45	53	0,943	0,038	45	12
	20-50 µm	50	60	19,37	1,17	136	2,058	0,124	146	9
	2-20 µm	260	273	15,13	4,13	482	1,826	0,499	587	8
	0-2 µm				0,99	115		0,097	114	10
	Fraction organique soluble							0,086		
	N minéral		976		7,54	879		0,908	101	
	Somme fractions			8,58			0,850		1068	10
	Sol non fractionné			9,16			0,935			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-20 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Témoin 2-b	200-2000 µm	444	408	1,31	0,54	62	0,072	0,030	35	18
	50-200 µm	209	208	2,52	0,53	61	0,190	0,040	47	13
	20-50 µm	36	37	12,81	0,47	55	1,064	0,039	46	12
	2-20 µm	50	55	19,07	1,05	123	2,118	0,117	138	9
	0-2 µm	260	267	15,33	4,09	477	1,851	0,494	581	8
	Fraction organique soluble				1,04	122		0,112	132	9
	N minéral							0,087	103	
	Somme fractions		975		7,72	900		0,918	1081	
	Sol non fractionné			8,58			0,850			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-21 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
Apport compost 1-a	200-2000 µm	368	420	1,95	0,82	77	0,155	0,065	61	13
	50-200 µm	269	226	3,54	0,80	75	0,277	0,062	59	13
	20-50 µm	47	22	12,27	0,27	25	0,803	0,018	17	15
	2-20 µm	46	76	26,43	2,00	187	2,131	0,161	152	12
	0-2 µm	271	257	18,74	4,81	451	2,171	0,557	527	9
	Fraction organique soluble				1,03	97		0,107	101	10
	N minéral							0,069	65	
	Somme fractions		1000		9,73	911		1,040	983	
	Sol non fractionné			10,68			1,058			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-22 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Annexe 11-22 : Résultats des fractionnements, essai C, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport compost 1-b	200-2000 µm	368	421	1,57	0,66	62	0,081	0,034	32	19
	50-200 µm	269	226	3,98	0,90	84	0,288	0,065	61	14
	20-50 µm	47	23	10,80	0,25	23	0,691	0,016	15	16
	2-20 µm	46	73	23,87	1,73	162	1,925	0,140	132	12
	0-2 µm	271	255	18,86	4,81	450	2,150	0,548	518	9
	Fraction organique soluble				1,00	94		0,108	102	9
	N minéral							0,072	68	
	Somme fractions		997		9,35	876		0,983	929	
Sol non fractionné				10,68			1,058			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-23 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Annexe 11-25 : Résultats des fractionnements, essai C, Gagnou, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport compost 2-a	200-2000 µm	488	427	2,01	0,86	85	0,144	0,062	63	14
	50-200 µm	205	190	4,12	0,78	77	0,355	0,067	69	12
	20-50 µm	31	40	17,70	0,71	70	1,463	0,059	60	12
	2-20 µm	40	77	23,03	1,78	175	2,142	0,165	169	11
	0-2 µm	235	263	18,31	4,81	474	2,253	0,592	605	8
	Fraction organique soluble				1,11	110		0,101	104	11
	N minéral							0,060	61	
	Somme fractions		997		10,05	991		1,106	1131	
	Sol non fractionné				10,14			0,978		10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-24 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 11 années d'application des traitements.

Tableau 11-27 : Résultats des fractionnements, des C, Cagnon, Cote & Fèvre, après 14 années d'application des traitements.										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport compost 2-b	200-2000 µm	488	457	2,01	0,92	91	0,133	0,061	62	15
	50-200 µm	205	182	4,73	0,86	85	0,344	0,063	64	14
	20-50 µm	31	36	16,70	0,59	59	1,368	0,049	50	12
	2-20 µm	40	72	21,73	1,56	154	2,176	0,156	160	10
	0-2 µm	235	267	18,00	4,80	474	2,379	0,635	649	8
	Fraction organique soluble				1,10	109		0,099	102	11
	N minéral							0,056	57	
	Somme fractions		1013		9,84	970		1,118	1143	
	Sol non fractionné			10,14			0,978			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-25 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Tableau III 25 : Résultats des fractionnements, Essai C, Sagnaou, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C			N		C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
témoin 1-a	200-2000 µm	502	488	1,58	0,77	110	0,068	0,033	50	23
	50-200 µm	186	186	2,25	0,42	60	0,167	0,031	47	13
	20-50 µm	28	22	8,58	0,19	27	0,575	0,013	19	15
	2-20 µm	50	65	15,82	1,02	147	1,302	0,084	128	12
	0-2 µm	235	239	14,96	3,57	511	1,741	0,415	631	9
	Fraction organique soluble				0,92	131		0,059	90	15
	N minéral							0,005	7	
	Somme fractions		999		6,89	986		0,640	974	
	Sol non fractionné			6,99			0,658			11

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-26 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
témoin 1-b	200-2000 µm	502	477	1,72	0,82	119	0,075	0,036	55	23
	50-200 µm	186	201	2,22	0,45	65	0,156	0,031	48	14
	20-50 µm	28	22	7,14	0,16	23	0,489	0,011	17	15
	2-20 µm	50	65	16,28	1,06	153	1,351	0,088	134	12
	0-2 µm	235	236	15,11	3,57	516	1,726	0,407	623	9
	Fraction organique soluble				0,93	134		0,018	27	53
	N minéral							0,005	8	
	Somme fractions		1002		6,98	1009		0,596	912	
	Sol non fractionné			6,91			0,654			11

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-27 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
témoin 2-a	200-2000 µm	546	509	1,11	0,57	88	0,072	0,036	56	15
	50-200 µm	145	160	2,52	0,40	63	0,204	0,033	50	12
	20-50 µm	34	38	12,20	0,46	72	1,034	0,039	60	12
	2-20 µm	41	85	15,43	1,31	204	1,427	0,121	187	11
	0-2 µm	234	211	15,23	3,21	501	1,704	0,360	556	9
	Fraction organique soluble				0,68	106		0,080	123	9
	N minéral							0,013	20	
	Somme fractions		1003		6,63	1034		0,681	1053	
	Sol non fractionné				6,42			0,647		10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-28 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N			C/N
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportion N sol (g kg ⁻¹)	
	200-2000 µm	546	519	1,31	0,68	106	0,071	0,037	57	19
	50-200 µm	145	164	2,72	0,45	69	0,219	0,036	55	12
	20-50 µm	34	31	10,99	0,34	53	0,842	0,026	41	13
	2-20 µm	41	86	15,23	1,31	204	1,543	0,133	205	10
	0-2 µm	234	227	15,02	3,41	532	1,750	0,397	614	9
témoin 2-b	Fraction organique soluble				0,62	96		0,068	105	9
	N minéral							0,015	23	
	Somme fractions		1027		6,81	1061		0,712	1100	
	Sol non fractionné			6,42			0,647			10

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-29 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Tableau III 29 : Résultats des fractionnements, total C, Cagnon, 2006 à 1996, après 22 années d'application de compost.										
Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport compost 1-a	200-2000 µm	495	503	1,80	0,91	101	0,134	0,067	80	13
	50-200 µm	201	191	4,04	0,77	86	0,267	0,051	61	15
	20-50 µm	28	24	8,53	0,21	23	0,591	0,014	17	14
	2-20 µm	44	69	19,99	1,37	152	1,637	0,112	134	12
	0-2 µm	232	207	18,89	3,92	436	2,161	0,448	534	9
	Fraction organique soluble				0,84	94		0,063	76	13
	N minéral							0,019	23	
	Somme fractions		994		8,02	892		0,776	924	
	Sol non fractionné			8,99			0,839			11

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-30 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport compost l-b	200-2000 µm	495	513	2,20	1,13	127	0,174	0,089	112	13
	50-200 µm	201	191	3,51	0,67	75	0,235	0,045	56	15
	20-50 µm	28	23	9,35	0,21	24	0,634	0,014	18	15
	2-20 µm	44	67	24,24	1,63	184	1,995	0,135	168	12
	0-2 µm	232	209	19,34	4,04	454	2,206	0,461	577	9
	Fraction organique soluble				0,90	102		0,059	74	15
	N minéral							0,015	19	
	Somme fractions		1003		8,59	966		0,818	1024	
Sol non fractionné				8,89			0,799			11

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-31 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)			C		N			C/N
		Avec destructio n matière organique	Sans destructio n matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportio n C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)	Proportio n N sol (g kg ⁻¹)	
Apport compos t 2-a	200-2000 µm	564	568	1,91	1,09	117	0,172	0,097	118	11
	50-200 µm	158	142	6,54	0,93	100	0,532	0,075	91	12
	20-50 µm	31	31	22,14	0,68	73	1,696	0,052	63	13
	2-20 µm	41	63	22,85	1,44	155	2,129	0,135	163	11
	0-2 µm	207	177	18,42	3,26	351	1,973	0,349	424	9
	Fraction organique soluble				0,70	75		0,078	95	9
	N minéral							0,020	24	
	Somme fractions		980		8,10	871		0,807	979	
	Sol non fractionné			9,29			0,824			11

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

Annexe III-32 : Résultats des fractionnements, essai G, Gagnoa, Côte d'Ivoire, après 22 années d'application des traitements.

Traite- ment et répé- tition*	Fractions	Proportion masse du sol (g kg ⁻¹)		C			N		C/N	
		Avec destruction matière organique	Sans destruction matière organique	Teneur (g C kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g C kg ⁻¹ sol)	Proportion C sol (g kg ⁻¹)	Teneur (g N kg ⁻¹ fraction)	Contenu (g N kg ⁻¹ sol)		Proportion N sol (g kg ⁻¹)
Apport compost 2-b	200-2000 µm	564	597	2,21	1,32	142	0,157	0,094	113	14
	50-200 µm	158	116	6,34	0,74	79	0,495	0,058	70	13
	20-50 µm	31	32	22,04	0,71	76	1,701	0,055	66	13
	2-20 µm	41	61	21,54	1,32	142	1,983	0,121	147	11
	0-2 µm	207	197	18,22	3,58	386	1,928	0,379	460	9
	Fraction organique soluble				0,73	78		0,073	88	10
	N minéral							0,018	22	
	Somme fractions		1003		8,40	903		0,797	967	
	Sol non fractionné			9,29			0,824			11

*X-y : répétition de terrain n°X, répétition de laboratoire y

**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur ANDREUX, Professeur, Université de Bourgogne, Dijon

Monsieur BAILLY, Professeur, ENSA, Toulouse

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur GUIBERT Hervé

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Evolution de la matière organique et de la capacité d'échange cationique des alfisols
tropicaux cultivés".**

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : **"SCIENCES AGRONOMIQUES"**

Fait à Vandoeuvre le, 21 septembre 1999

Le Président de l'I.N.P.L.,

J. HARDY



LA GOUTTE D'ENCRE

**53 place Thermidor
Le Parvis des Facultés
34000 MONTPELLIER
FRANCE
Tél : 04-67-65-30-96**

Résumé -La pression foncière et l'abandon progressif des jachères caractérisent l'évolution de la plupart des systèmes de culture pratiqués dans la zone soudanienne. C'est le cas du Bassin cotonnier du Tchad où des baisses de productions agricoles touchent des zones densément peuplées. L'étude se fonde sur un diagnostic agronomique, des essais longue durée in situ et des analyses de laboratoire avec notamment des fractionnements de la matière organique (MO) du sol. Le diagnostic montre que la teneur en C de l'horizon de surface est un indicateur de productivité du sol au même titre que les taux d'argile, pH, CEC et teneurs en bases échangeables. Le rendement du cotonnier chute à partir de valeurs de teneur en C de $3,4 \text{ g kg}^{-1}$ et de CEC de $2,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. La minéralisation de la MO du sol apparaît comme le processus d'évolution majeur affectant la productivité des sols. L'acidification des sols et la lixiviation des bases échangeables surviennent parallèlement, sans affecter aussi fortement la capacité du sol à produire. Des mesures réalisées sur des essais au Tchad et en Côte d'Ivoire comparant des parcelles cultivées avec et sans apports de MO montrent que les variations du taux de MO de l'horizon cultural sont du même ordre de grandeur que les variations spatiales observées dans le diagnostic. Seuls des apports conséquents de fumier maintiennent ce taux juste au dessus du seuil de $3,4 \text{ g kg}^{-1}$. Les enfouissements de MO fraîche ont une efficacité moindre que celle du fumier. Le fractionnement granulométrique de la MO du sol montre que les apports de fumier ou compost permettent d'augmenter les fractions de MO de toute taille, même les fractions de la taille des argiles. La fraction organo-minérale du sol de la taille des argiles participe pour 80% à la CEC des sols, grâce notamment à une CEC d'origine organique par unité de C quatre fois supérieure à celle des fractions de taille supérieures (1000 vs $270 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de C). L'application du modèle de Hénin-Dupuis aux fractions confirme que les fractions de la taille des argiles sont plus stables (demi-vie de 17 ans) que celle de la taille des limons (demi-vie de 10 ans) et des sables (demi-vie de 2 ans). Malgré cette relative stabilité, cette fraction de matière organique peut diminuer fortement si aucune gestion organique correcte n'est réalisée sur les parcelles cultivées.

Organic Matter and Cation Exchange Capacity Changes in Tropical Cultivated Alfisols

Abstract -As in a large part of Sudanian zone, the farming systems practiced in the Chad cotton basin, where population growth rate is high, are characterized by increased pressure on land, the gradual abandonment of fallow periods, and falling agricultural output. Our study was based on an agronomic diagnosis, long-term fields trials and laboratory analyses, particularly the fractionation of the soil without destroying of its organic matter (OM) into five size classes. The diagnosis showed that the C content of the topsoil was indicative of soil productivity, as were clay content, CEC and exchangeable bases levels. Cotton yields fell at C contents of below 3.4 g kg^{-1} and a CEC of under $2.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Soil OM mineralization seemed to be the main evolutive process affecting soil productivity. Soil acidification and base leaching occurred concurrently, but had a less marked effect on soil productivity. Measurements made in Chad and Côte d'Ivoire in trials comparing plots cultivated with and without OM applications showed that the variations in the OM content of the top horizon were similar in scale to the spatial variations observed in the agronomic diagnosis. Only substantial manure applications were sufficient to keep C contents just above the threshold of 3.4 g kg^{-1} . Digging in fresh OM was less effective than using manure. Particle size fractionation of soil OM showed that manure or compost applications increased the level of every size of OM fraction, even the clay-sized fraction. The clay-sized organo-mineral fraction accounted for 80% of the soil CEC, notably due to a CEC of organic origin per C unit four times greater than that of the larger fractions (1000 as against $270 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ C). Applying the Hénin-Dupuis model to the fractions confirmed that the clay-sized fractions were more stable (17-year half-life) than the silt-sized and sand-sized fractions (10-year and 2-year half-life respectively). Despite this relative stability, this organic matter fraction can shrink rapidly in the absence of appropriate organic management.