DK536547 CD-RP15868

CIRAD / UR Systèmes Cotonniers

Rapport de mission auprès de l'ITRA

CRA_SH - Kolokopé - Togo

Fertilité des sols en zone cotonnière.

Mission réalisée du 24 Octobre au 2 Novembre 2006

grâce à la contribution financière du SCAC / LOME.

Michel CRETENET
CIRAD CA
UR Systèmes cotonniers en petit paysannat

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

CIRAD
000084900

Station de Kolokopé

Mission d'appui auprès du programme coton du CRA_SH.

Proposition d'un programme de recherches sur les questions de fertilisation et de fertilité des sols. Identification d'un travail de thèse.

Michel CRETENET
du 24 Octobre au 2 Novembre 2006.

Sommaire:

Résumé

Introduction

1. Composantes de la fertilité des sols et processus de dégradation de la fertilité.

2. Propositions de programme dans le domaine de la fertilité du sol.

   2.1. Correction des déficiences minérales.
   2.2. Limitation du processus d'acidification du sol.
   2.3. Entretien du statut organique du sol.
   2.4. Contours d'un travail de thèse en "économie environnementale".

Conclusions

Annexe 1 : Calendrier et déroulement de la mission
Annexe 2 : Références bibliographiques
Annexe 3 : Eléments de protocoles expérimentaux
Annexe 4 : Planche photographique illustrant les déficiences K et Mg.
Annexe 5 : Eléments budgétaires de l'appui au programme de thèse.

26 JAN. 2007

Remerciements :

Je tiens à remercier l'ITRA à travers M. C. A. AGBOBLI son Directeur Général, M. BONFOH le Directeur du CRA-SH et M. Y. POCANAM le Directeur du CRA-L, pour leur accueil chaleureux et la parfaite organisation de cette mission. Merci également à l'Ambassade de France à travers M. O. BOUCHER (Chef du SCAC) d'avoir permis par sa contribution financière, la réalisation de cette mission.

Résumé :

La mission avait pour objectifs :

a. de porter un diagnostic sur la fertilité des sols de la zone cotonnière du Togo afin de poser les grandes questions auxquelles la recherche devra répondre à plus ou moins long termes.
b. d'identifier dans le cadre de cette analyse, un travail de thèse à confier à un étudiant togolais qui puisse contribuer à valoriser les dispositifs d'étude de la fertilité des sols de longue durée conduits au Togo.

Un ensemble important d'études et d'expérimentations plus ou moins récentes, sur la fertilisation et la fertilité des sols en zones cotonnières ont été réalisées au Togo et ailleurs en Afrique de l'Ouest (Mali, Burkina Faso, Bénin, Côte d'Ivoire). La plupart de ces études attribuent un rôle moteur essentiel à la composante chimique du sol dans le processus de dégradation de la fertilité des sols. Les bilans minéraux en certains éléments sont depuis plusieurs décennies chroniquement déficitaires et les réserves du sol en ces éléments s'épuisent. Ainsi, après quelques 10 à 20 années de culture selon les réserves minérales du sol, des déficiences minérales notamment en potassium et en magnésium sont induites par les pratiques culturales paysannes. Actuellement la fréquence élevée des symptômes foliaires correspondant à ces déficiences minérales témoigne de l'importance du phénomène. Cette situation n'est pas spécifique du Togo et tous les vieux bassins cotonniers d'Afrique de l'Ouest connaissent un développement analogue de ces déficiences minérales révélées par l'aspect des cultures. Les principales conséquences à court terme de ces déficiences minérales sont un moindre rendement qui résulte d'un poids moyen capsulaire plus faible en particulier pour la déficience en potassium, et une moindre qualité de la fibre et de la graine (faible indice micronaire et faible seed index en situation de déficience en K).

Par ailleurs, deux conséquences à plus long terme résultent de l'apparition de ces déficiences minérales induites par les modes de culture pratiqués (faiblesse des fumures et des restitutions organiques) : l'acidification du sol et la baisse du taux de matière organique du sol. Le sol s'acidifie du fait de la perte de bases (K, Ca, Mg) du complexe d'échange cationique du sol. De façon concomitante la baisse de la biomasse produite en situations de déficiences minérales induit une diminution des quantités de carbone retournées au sol (racines et résidus de la culture). Cette diminution du taux de carbone du sol affecte deux fonctions essentielles de la matière organique du sol : la libération d'éléments minéraux par le processus de minéralisation de la matière organique du sol et la capacité d'échange cationique du sol associée aux particules fines de carbone du sol.

La mission recommande la conduite de recherches sur les trois problématiques de la dégradation des sols identifiées, à savoir : la correction de déficiences minérales, le contrôle du processus d'acidification du sol et l'entretien du statut organique du sol.

L'étude du statut organique du sol correspond à la caractérisation des fonctions de la matière organique du sol (MOS) selon les quantités et la nature des biomasses restituées au sol. Cette caractérisation concerne le coefficient de transformation de la biomasse en matière organique du sol (coefficient iso-humique K_1 du modèle Hénin

Dupuis), la minéralisation annuelle de la matière organique du sol (coefficient K_2 du modèle Hénin Dupuis), et la contribution des fractions granulométriques du carbone du sol à la capacité d'échange cationique du sol (CEC). Ces questions dans le domaine des sciences du sol sont des questions "pointues" et communes à l'ensemble des zones cotonnières de la sous région, aussi méritent elles d'être abordées dans le cadre d'un projet de recherches à caractère régional qui pourrait être porté par le CORAF.

Les dispositifs de longue durée conduits au Togo pour l'étude de l'évolution de la matière organique du sol (rôle des jachères, restitution des résidus de culture, fumure organique ...), constituent un support exceptionnel du fait des nombreuses analyses de sols effectuées,. Les systèmes de culture mis en place à partir de 1965 pour le plus ancien et 1977 pour les autres, sur les différents Points d'Appui (Elavagnon, Dalanda, Tchamba, Kabou, Dapaon, Toaga) ont été identifiés comme des éléments essentiels de la base de données à constituer pour initier un travail de thèse. Il conviendra de caractériser en 2007 le statut organique du sol des parcelles de ces anciens essais de façon à disposer de séries diachroniques sur une longue période : année de mise en place, 10 ans plus tard, puis après 30 ans. Cette approche devra être complétée par l'étude synchronique de systèmes de cultures en milieu paysan qui mettent en jeu différentes modalités de gestion des restitutions organiques (restitution ou non des résidus de culture, utilisation de fumure organique, mulch, jachère, plantes de couverture ...). Cet ensemble devrait permettre une bonne estimation des paramètres d'un modèle simple comme celui de Hénin Dupuis par exemple. Le travail de thèse comprendra l'analyse économique permettant de mettre en rapport le niveau de fertilité du sol à l'équilibre (taux de MOS) et le système de culture pratiqué. Ce travail propose une méthode d'estimation du coût et de la valeur du carbone des sols du Nord Togo. L'objectif de ce travail de recherches est ambitieux, il s'agit en effet de fournir des éléments d'aide à la décision pour SOTOCO dans le choix des systèmes de culture à promouvoir visant une plus grande durabilité de la production cotonnière dans sa zone d'intervention.

Introduction :

La SOTOCO présente le recul important de la production cotonnière ces dernières années, en passant de 173.000 T en 2004 à 65 000 T en 2005 et à 62 000 T (estimation) en 2006, comme la résultante de la baisse des superficies et de celle des rendements. Si la baisse des superficies peut être imputée à la conjoncture économique : baisse du prix d'achat du coton graine et problèmes du règlement des campagnes 2004 et 2005, la baisse des rendements a des causes multiples dont la diminution des quantités d'engrais appliquées (100 à 150 kg/ha en moyenne selon SOTOCO) et la dégradation de la fertilité des sols.

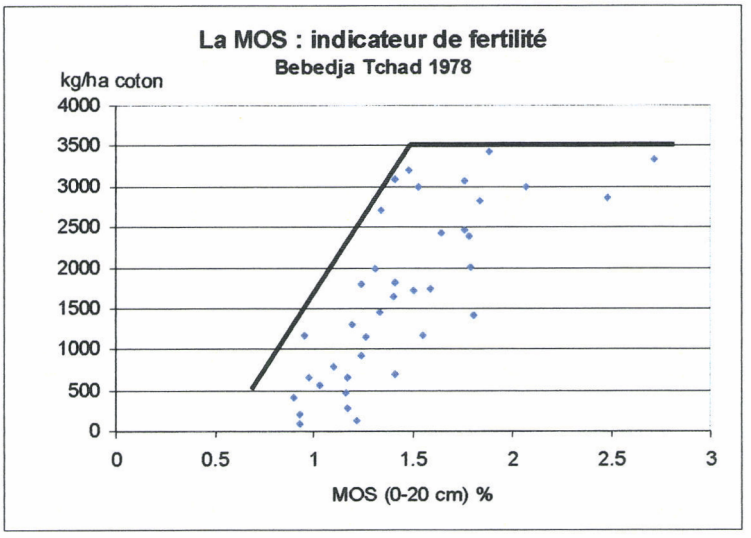
Ces inquiétudes de la SOTOCO sur la baisse des rendements et sur l'évolution de la fertilité des sols dans la zone cotonnière togolaise sont partagées par la plupart des Sociétés Cotonnières qui interviennent dans les anciens bassins cotonniers d'Afrique de l'Ouest, notamment au Mali et au Burkina. Il faut cependant se garder de raccourcis qui attribueraient à la culture cotonnière un rôle moteur dans cette dégradation de la fertilité des sols. C'est en effet la détérioration du contexte économique qui a conduit à la relative extensification des systèmes de culture cotonniers. Ainsi, à la fin des années 70, un kg de coton graine permettait au paysan togolais d'obtenir 4 kg d'engrais subventionné, en 2006 il n'obtient plus que 0.6 kg d'un engrais qui n'est plus subventionné pour la même quantité de coton graine vendue ! Aussi la baisse des quantités d'engrais appliquées sur les parcelles coton, en réponse à cette dégradation des termes de l'échange est tout à fait logique de la part du paysan. Parmi les conséquences de cette extensification des pratiques culturales, c'est moins la baisse immédiate des rendements que la perte de fertilité du sol induite par l'extensification du système de culture qui est dommageable et inquiétante. La première partie de ce rapport présente le cadre conceptuel dans lequel sont posées aujourd'hui les questions de recherche sur la fertilité du sol et son évolution en fonction des systèmes de culture pratiqués. La seconde partie constitue un ensemble de propositions d'opérations de recherche permettant d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

1. Composantes de la fertilité des sols de savanes cotonnières et processus de dégradation de la fertilité.

Il y a consensus de la communauté des agronomes pour considérer le taux de carbone du sol, soit sa teneur en matière organique (MOS % = 1.72 * C %), comme le meilleur indicateur synthétique de sa fertilité. *Les résultats des nombreux tests en blocs dispersés conduits sur des parcelles paysannes et sur lesquels des analyses de sols ont été réalisées, devraient permettre d'établir cette relation dans les conditions du Togo.*

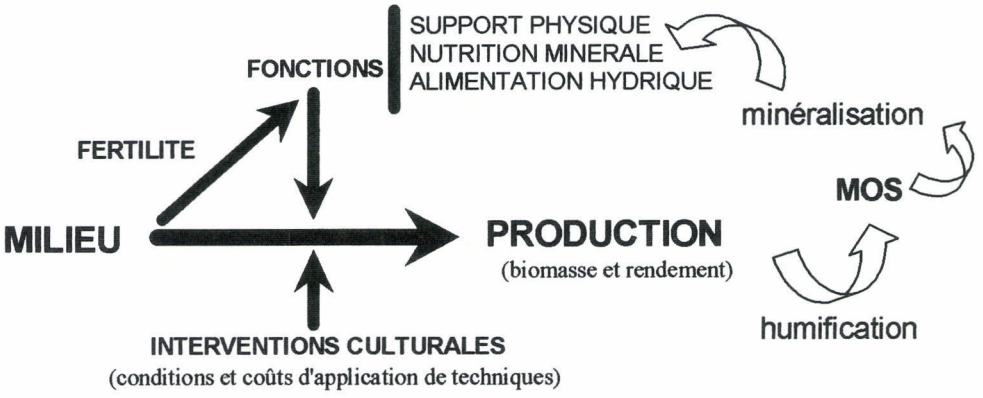
A titre d'exemple la figure suivante illustre cette relation entre matière organique du sol et rendements obtenus sur la station de Bebedja au Tchad[1].

[1] L. Richard, B. Djoulet. 1985 La fertilité des sols et son évolution en zone cotonnière au Tchad. Coton et Fibres Tropicales Vol.40 n°6



Dans les conditions tchadiennes le potentiel de production de la variété cultivée à la fin des années 70 (3.5 T/ha) ne peut être atteint qu'au-delà d'un seuil de 1.5 % de MOS dans l'horizon 0-20 cm.

La fertilité du sol doit être comprise comme la contribution du sol au processus de production, c'est-à-dire à travers les fonctions de support physique aux cultures et de réserve en eau et en éléments minéraux pour la nutrition des plantes.



Processus de production et fertilité du sol.

Le processus de production comprend l'ensemble de la biomasse à savoir l'appareil végétatif aérien, les racines et la récolte. Une partie de cette biomasse (résidus de culture, racines) retourne au sol pour intégrer au terme d'un processus d'humification relativement rapide en conditions tropicales, le stock de la matière organique du sol (MOS) et contribue ainsi à améliorer la fertilité du sol. Une partie (annuellement 5 à 6%) de la MOS sous l'action de bactéries "minéralise" et libère ainsi les éléments minéraux, principalement l'azote, nécessaires aux cultures. C'est là une contribution de la MOS à la nutrition minérale de la culture.

La composante physique de la fertilité du sol intègre les interactions entre les compartiments organiques du sol (de surface et incorporées, brutes et humifiées) et la dynamique de l'eau, à travers :

- les états de surfaces : les particules et éléments organiques à la surface du sol modifient les conditions de ruissellement et d'érosion, d'infiltration et d'évaporation. Aussi les mulch et les techniques de gestion des résidus de culture, prennent toute leur importance dans les situations où la durée de la saison des pluies est particulièrement courte. En effet, les résidus organiques en améliorant l'infiltration des premières pluies et en combinaison avec les techniques de semis direct, vont permettre par une implantation précoce de la culture de rallonger le cycle de la culture et augmenter ainsi le potentiel de production. Par ailleurs, en limitant les pertes par évaporation durant le cycle de culture, la technique du mulch pourra augmenter les disponibilités en eau dans le sol en fin de campagne et rallonger ainsi le cycle de la culture.

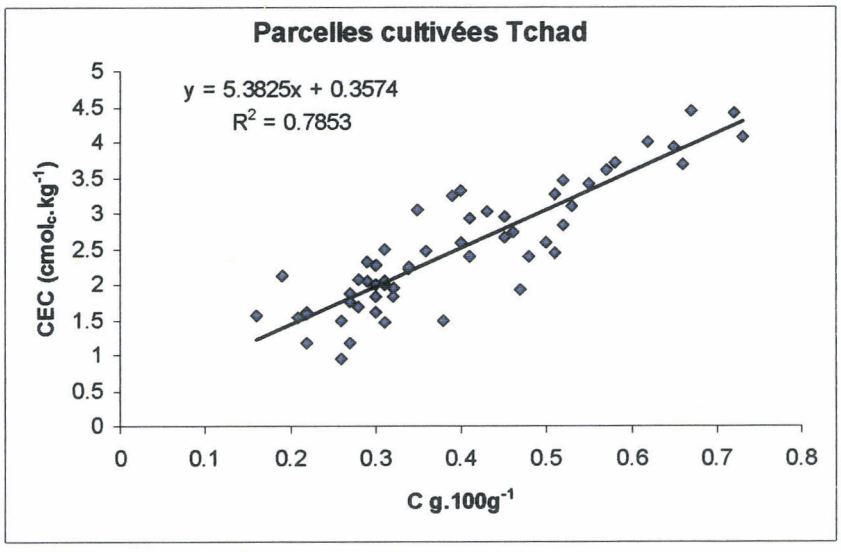
- la structure du sol : c'est le "complexe argilo-humique" associant sous forme d'agrégats des particules d'argile et des molécules organiques (humus) qui constitue la structure du sol. La structure du sol est en relation avec l'enracinement des cultures et la dynamique de l'eau : une bonne structure diminue la contrainte mécanique vis-à-vis de l'enracinement, elle augmente la réserve en eau du sol, elle diminue l'évaporation du sol, elle améliore l'accès aux réserves minérales et hydriques à travers la solution du sol.

Le sol assure par ailleurs une fonction de réserve et de mise à disposition d'éléments minéraux indispensables à la croissance des plantes, ces éléments minéraux proviennent de l'altération de la roche mère et de la minéralisation de la matière organique. Certains de ces éléments comme le phosphore, le soufre ou l'azote (NO_3) sont "libres" ils suivent les mouvements de l'eau dans le sol et sont sous une forme assimilable par les racines dans la solution du sol. D'autres comme le calcium (Ca^{++}) le magnésium (Mg^{++}) ou le potassium (K^{+}) sont retenus par les charges négatives que présentent les particules d'argiles et les molécules organiques du sol, cette caractéristique de l'argile et de la matière organique du sol vis-à-vis des cations (ions chargés positivement) correspond à ce que l'on appelle la capacité d'échange cationique (CEC) du sol. La matière organique du sol (MOS) participe à la fois à la capacité d'échange cationique et à la mise à disposition d'éléments minéraux lors de sa minéralisation.

- la capacité d'échange cationique (CEC) : dans un sol ferrugineux tropical, la part de la CEC correspondant aux fractions les plus fines de la MOS (<2µm) représente jusqu'à 80 % de la capacité d'échange totale du sol, le complément soit de l'ordre de 20 % de la CEC, correspond à des argiles de type kaolinite dont le taux varie de 5 à 10 %. Le graphe suivant[2] illustre l'importance du carbone du sol dans sa contribution à la capacité d'échange cationique : avec une teneur en carbone de 0.5% (soit MOS 0.86 %), la CEC estimée atteint 3.05 cmole.kg^{-1} dont 88 % correspond à la composante organique. *Les nombreux résultats d'analyses de sols disponibles (A, MO et CEC) dans les archives du CRA_SH à Kolokopé,*

[2] Evolution de la matière organique et de la capacité d'échange cationique des alfisols tropicaux cultivés. Guibert H., 1999. s.l., 203 p Thèse Dr de l'INPL.

devraient permettre de quantifier les contributions respectives des argiles et de la MOS à la CEC des sols au Togo.



L'ordonnée à l'origine de la droite de régression (0.36 cmole.kg^{-1}) correspond à la "composante argile" de la CEC, le coefficient de la droite de régression (5.38) à l'importance de la "composante MOS" de la CEC.

- la garniture cationique de la CEC : la minéralisation (biologique ou brûlis) de la matière organique en libérant du calcium (Ca^{++}), du magnésium (Mg^{++}) et du potassium (K^{+}) contribue à regarnir la CEC et à limiter ainsi l'acidification du sol. Un ordre de grandeur des quantités de cations (K^{+}, Ca^{++}, Mg^{++}) contenus dans l'horizon 0-20 cm sous forme échangeable est estimé dans le tableau suivant :

Sol type des zones de savanes cotonnières (ferrugineux tropical ou alfisol) :

	MOS	C	CEC	Ca	Mg	K
Teneurs 0-20 cm	0.58 %	3.3 g.kg^{-1}	2.25 cmole.kg^{-1}	1.6 cmole.kg^{-1}	0.4 cmole.kg^{-1}	0.12 cmole.kg^{-1}
quantité/ha		10 T		1000 kg	140 kg	140 kg

Processus de dégradation de la fertilité du sol :

Les études en parcelles paysannes et les expérimentations de longue durée sur l'évolution de la fertilité des sols sous les systèmes de culture cotonniers sont nombreuses (cf. annexe 2). Ces études tendent à démontrer que la composante chimique du sol joue un rôle moteur essentiel dans l'initialisation du processus de dégradation de la fertilité du sol. Une fois le processus initialisé, c'est le statut organique du sol qui est affecté et la principale manifestation correspond à une baisse des rendements du cotonnier et des cultures en rotation. La démonstration

est particulièrement évidente dans les conditions camerounaises[3] (sols ferrugineux sur grès des régions de Garoua et Ngong) et les mécanismes mis en évidence au Mali dans des essais de longue durée[4] confirment le processus.

Les déficiences minérales à l'origine du processus.

Les bilans minéraux en certains éléments (apports par les engrais et les fumures organiques - exportations par les récoltes et les résidus de culture non restitués au sol) sont chroniquement déficitaires et les réserves du sol en ces éléments s'épuisent. Ainsi après quelques 10 à 20 années de culture selon les réserves minérales du sol, des déficiences minérales en potassium et en magnésium sont induites par les modes de culture en cours.

Les exportations minérales pour les différents cations, par les récoltes et les résidus de culture sont évaluées dans le tableau suivant :

	Eléments kg/ha[5]		
	Ca	Mg	K
COTON (1600 kg/ha)			
Récolte	2	3	12
Résidus	25	10	67
MAIS (2300 kg/ha)			
Récolte	2	3	12
Résidus	10	8	80
SORGHO (1000 kg/ha)			
Récolte	1	2	5
Résidus	11	10	58
Cations échangeables (0-20 cm) Sol ferrugineux type	1000 kg	140 kg	140 kg

Il est clair que le statut potassique (et dans une moindre mesure le statut magnésien) des sols ferrugineux types est extrêmement fragile avec la perte de 4 à 30 % du potassium échangeable (1 à 5 % pour le magnésium échangeable) exporté par an en fonction du mode de gestion des résidus de culture. Les apports minéraux sous forme d'engrais ne concernent que le potassium et correspondent à 12.5 kg K (15 kg K_2O) pour 100 kg d'engrais NPKSB correspondant aux formules vulgarisées actuellement. Les bilans minéraux pour tous les cations sont chroniquement déficitaires compte tenu de la gestion actuelle des résidus de culture (au mieux le brûlis !).

Déjà en 1993, la question de l'émergence de déficiences potassiques était soulevée au Mali[6] en particulier dans le vieux bassin cotonnier de Koutiala, où sur la base de

[3] OBSERVATOIRE DE LA FERTILITE AU NORD CAMEROUN : Evolution de la fertilité des sols du bassin de la Bénoué 2004 (C.Fesneau, mémoire de DEA).

[4] Expérimentation des systèmes de culture dans les pays tropicaux : cas des zones cotonnières d'Afrique noire. Crétenet M., 1994.

[5] C.PIERI 1989. Fertilité des terres de Savanes : bilan de trente années de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara.

données de la CMDT (fertilisations et rendements) le bilan potassique d'une rotation triennale Coton / Sorgho / Sorgho couramment pratiquée à l'époque pouvait s'établir ainsi :

	Fumure K (kg/ha)		Exportations K (kg/ha)		Bilan K
	engrais	fumier	récolte	résidus	
Coton	12	17	11	16	+2
Sorgho 1	4	17	5	52	-36
Sorgho 2	4	17	5	52	-36
				sur 3 ans	-70

Le bilan "moyen annuel" accusait ainsi un déficit annuel de l'ordre de 23 kg K/ha (30 K_2O/ha/an). Cette évaluation d'une situation préoccupante venait confirmer les résultats d'"enquêtes potassium" par diagnostic foliaire sur cotonnier réalisées en 77 et 88 en milieu paysan avec des cas de présomption de déficience (F(K)< 90%) qui étaient passés de 3% en 77 à 14% en 88 !
Aussi, les symptômes caractéristiques des déficiences potassique et magnésienne illustrées ci-après, sont de plus en plus couramment observés au Togo et dans les vieux bassins cotonniers.

Symptômes foliaires de déficiences en potassium et en magnésium.

A ces symptômes sont associées des baisses de rendement plus spécialement dus à de faibles poids moyens capsulaires, voire à la "momification" des capsules pour ce qui concerne le potassium. La période d'assimilation la plus intense du potassium correspond en effet à la phase de "remplissage" des capsules.

Actuellement la fréquence élevée des symptômes foliaires correspondant à ces déficiences minérales que l'on peut observer en milieu paysan, témoigne de l'importance du phénomène. Cette situation n'est pas spécifique au Togo et les vieux bassins cotonniers d'Afrique de l'Ouest connaissent un développement semblable de ces déficiences minérales révélées par l'aspect des cultures.

[6] M.Cretenet 1993. Rapport de mission d'appui au Projet Mali Sud III (FAC).

L'acidification du sol.

Deux conséquences résultent de l'apparition de ces déficiences minérales : l'acidification du sol et la baisse des volumes de biomasse élaborée. L'acidification du sol correspond dans un premier temps à la désaturation (remplacement des ions Ca^{++}, Mg^{++} et K^{+} par des ions H^{+}) du complexe d'échange cationique constitué des argiles et des particules fines du carbone du sol. A un stade plus avancé du processus, les ions Al^{+++} du complexe d'échange passent dans la solution du sol et provoquent le phénomène de toxicité aluminique à laquelle le cotonnier est particulièrement sensible. Quelques cas de "stérilité" ont pu être attribués à la toxicité aluminique, notamment dans le sud du Bénin.

L'essai mis en place en 1970 à Aplahoué (Sud Bénin), illustre particulièrement bien le processus d'acidification du sol. Le dispositif mis en place sur terre de Barre avec une succession annuelle maïs-coton permet d'étudier l'évolution de la fertilité du sol sous différents modes de fertilisation minérale et de gestion des apports organiques. Ainsi, dans une phase dite d'"épuisement" de 10 années, 6 objets étaient en comparaison :

- 2 modalités pour la fertilisation minérale :
  F_0 : témoin non fertilisé
  F_1 : (115 N + 72 P_2O_5 + 60 K_2O) / ha / an

- combinées à 3 modes de gestion des apports organiques :
  a : exportation totale des résidus de culture
  b : restitution directe des résidus de culture
  c : b + paillage (10 T/ha/an de pailles extérieures au dispositif).

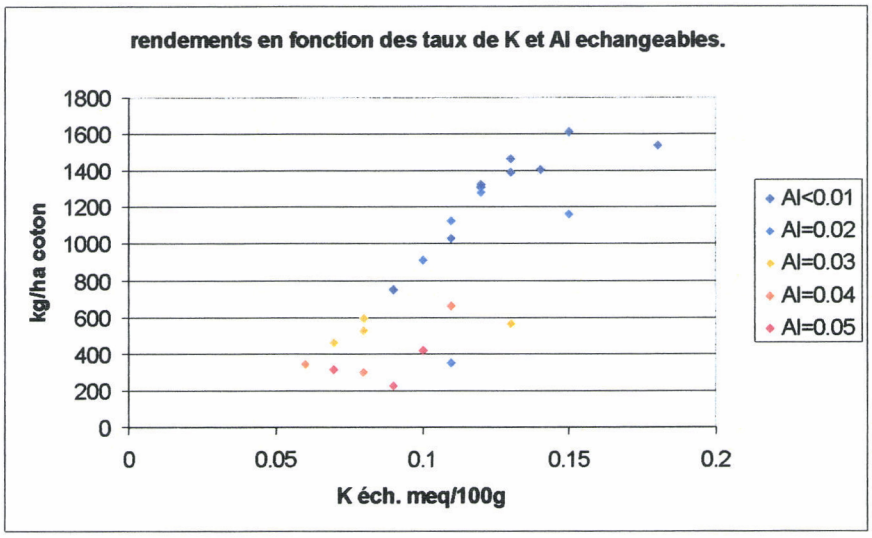
En 1980, au terme de cette phase d'épuisement, la stérilité des parcelles sans fertilisation minérale avec exportation des résidus de culture est atteinte (43 kg/ha en maïs et 21 kg/ha en coton).

	Rendements au terme de la phase d'"épuisement" (kg/ha)	
objets	Maïs	Coton
F0a	43	21
F0b	347	256
F0c	2469	1895
F1a	686	207
F1b	1346	855
F1c	3205	2304

En 1980, des prélèvements de terres ont été effectués sur chacune des 48 parcelles élémentaires du dispositif selon 5 horizons (0-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-50cm et 50-70cm). De l'analyse de ces sols, il ressort :

- le rôle acidifiant (0.5 point de pH) de la fumure minérale, plus particulièrement entre 20 et 50cm de profondeur. La désaturation du complexe porte sur le calcium et le magnésium.
- par contre, il y a enrichissement relatif en P_2O_5 assimilable et K échangeable avec la fumure minérale.
- on ne note pas d'effet de la fumure minérale sur le taux de matière organique du sol (M.O.S.).
- la restitution des résidus de culture a un effet sur le taux de MOS.
- la restitution des résidus contribue à une meilleure garniture cationique du complexe, essentiellement pour le Ca et le K. L'effet sur le pH apparaît en deça de 20cm.
- C'est le paillage qui a les effets les plus marqués, aussi bien sur le taux de MOS que sur le pH et la garniture du complexe d'échange cationique (K, Ca, Mg).

L'importance du statut potassique et de l'apparition d'aluminium échangeable sur le rendement en coton est particulièrement bien illustrée par le graphe suivant :



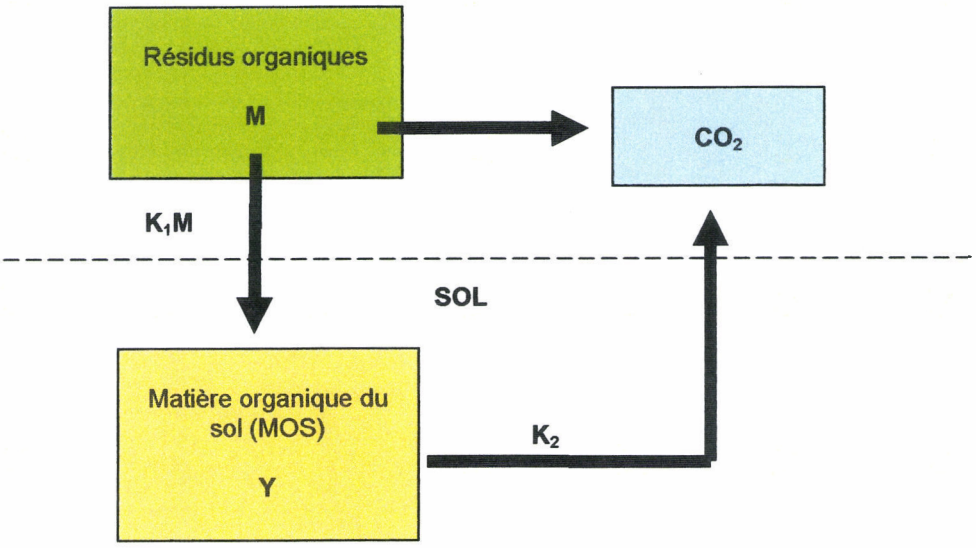
Dans les sols où la contribution de la MOS à la CEC est importante, la baisse de pH correspondant à la désaturation du complexe d'échange est moins importante que dans des sols plus argileux, du fait qu'il y a une diminution de la CEC (baisse du taux de carbone du sol) simultanée à la désaturation du complexe, mais le risque d'une toxicité aluminique demeure.

L'altération des fonctions de la MOS : minéralisation et CEC.

La baisse des biomasses produites est une conséquence immédiate du processus d'acidification du sol. Cette baisse concerne aussi bien les rendements que les quantités de carbone correspondant aux racines et aux résidus de la culture retournés au sol. Aussi, la diminution du taux de matière organique du sol qui en résulte, affecte deux fonctions essentielles de la MOS : la libération d'éléments minéraux par le processus de minéralisation de la matière organique du sol et la capacité d'échange cationique du sol correspondant aux particules fines de carbone.

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

Pour estimer le bilan organique du sol, le modèle Hénin Dupuis est couramment utilisé. Une partie des résidus organiques bruts ou des apports organiques (fumiers, composts, terres de parcs ...) est directement minéralisée produisant du CO_2, une autre partie K_1 M (K_1 coefficient iso humique dépendant de la nature des résidus organiques) entre dans le compartiment organique du sol (MOS).



Modèle de Hénin Dupuis

La matière organique du sol (MOS) va quant à elle minéraliser selon un coefficient de minéralisation annuel K_2 appliqué à la quantité Y diminuant d'autant le taux initial de carbone du sol. Cette diminution de la MOS va tendre vers une situation d'équilibre pour laquelle les "entrées annuelles" de carbone dans le sol provenant des résidus et apports organiques (fumure organique, résidus de culture, systèmes racinaires) équilibrent la minéralisation de la MOS (K_2Y).

Une étude récente conduite au Nord Cameroun[7] établit la valeur estimée de K_2 à 0.06 (6% de la MOS sont ainsi annuellement minéralisés), valeur comparable aux estimations réalisées par ailleurs en Afrique. Appliqué au sol ferrugineux type évoqué précédemment, ce sont donc quelques 600 kg/ha/an de carbone du sol qui sont minéralisés annuellement dans l'horizon 0-20cm.

Les quantités de matières organiques à incorporer dans le sol pour compenser ces pertes par minéralisation varient de 1.5 TMS/ha/an si il s'agit d'apports organiques type fumier (K_1#0.40), à 4 TMS/ha/an si il s'agit de résidus de culture (K_1#0.15).

Les quantités de matière sèche en mesure d'être restituées au sol dépendent de la culture et sont en relation avec le rendement par le biais de l'indice de récolte (harvest index). A titre d'exemples : pour un rendement coton de 1600 kg/ha, les résidus de culture sont de l'ordre de 3 TMS/ha, un rendement sorgho de 1500 kg/ha correspond à 4 TMS/ha sous forme de résidus de culture et un rendement maïs de 2300 kg/ha correspond à 2.5 TMS/ha. On est loin des 4T/ha/an de MS en mesure d'équilibrer la perte par minéralisation annuelle évaluées précédemment. La conséquence est que le taux initial de carbone du sol 3.3 $g.kg^{-1}$ va baisser jusqu'à un niveau où il y aura équilibre entre les quantités de carbone du sol minéralisées et les

[7] Observatoire de la fertilité au Nord Cameroun. C.Fesneau 2004. Mémoire de DEA.

quantités de carbone apportées par la matière sèche des résidus de culture complétées éventuellement des apports de fumier, composts ou terres de parcs. L'étude conduite au Cameroun évalue le taux d'équilibre à partir de quelques 27 situations culturales analysées à 3 reprises à 8, 14, 31 ans d'intervalles, à 2.6 $g.kg^{-1}$, taux pour lequel la minéralisation de 500 kg C/ha/an pourra être équilibrée soit sous forme de résidus de culture (3 TMS/ha/an), soit par des apports de fumier (1250 kg/ha/an) de bonne qualité. On voit ici toute la fragilité des équilibres entre les différentes composantes du cycle du carbone sous ces latitudes et pour ce type de sols.

2. Propositions de recherches dans le domaine de la fertilité du sol.

Le programme proposé concerne les 3 problématiques de recherche abordées dans la présentation du processus de la dégradation des sols. Cela concerne la correction des déficiences minérales induites au cours du temps, le contrôle du processus d'acidification du sol et l'entretien du statut organique du sol.

2.1. Correction des déficiences minérales.

L'objectif du dispositif proposé est d'évaluer la situation des déficiences minérales en milieu paysan et de la possibilité de corriger ces déficiences. Le dispositif est constitué de tests (50 lignes de 25 m = 1000m²) implantés dans des parcelles paysan et comparant 5 fumures :

- FP : fumure pratiquée par le paysan sur l'ensemble de sa parcelle.
- FP+K : FP + 50 kg/ha KCl (ou K_2SO_4)
- FP+K+Mg : FP + 50 kg/ha KCl (ou K_2SO_4) + 50 kg/ha Kiésérite
- FP+K+Ca+Mg : FP + 50 kg/ha KCl (ou K_2SO_4) + 100 kg/ha dolomie
- FP+FO : FP + 5 T/ha de terre de parc.

L'objet FP+FO nécessitera d'apporter 100 kg de terre de parc sur la parcelle, il faudra s'assurer lors du choix des implantations que l'opération est réalisable : disponibilité de terre de parc dans un rayon raisonnable.

Les principaux éléments du protocole constituent l'annexe 3.

L'estimation du Poids Moyen Capsulaire sera effectuée sur une des lignes de bordure de chaque objet (dénombrement des capsules récoltés et pesée du coton graine correspondant). Un échantillon de coton graine sera prélevé sur chacun des objets pour détermination du seed index (poids de 100 graines) et analyse de la maturité de la fibre (IM).

La situation de chaque test devra être repérée si possible par ses coordonnées géographiques (GPS) de façon à pouvoir compléter par un éventuel prélèvement de sol, l'interprétation des résultats à la récolte. Les éléments du calendrier cultural seront enregistrés et l'observation de symptômes de déficiences en K et Mg sera faite par les agents chargés du suivi du dispositif. Une planche de photographies (annexe 4) illustrant ces symptômes leur sera fournie en début de campagne. Des observations sur ces symptômes dans des parcelles qui ne font pas partie du dispositif sont souhaitables afin de valider la représentativité du dispositif.

Il convient d'avoir un objectif de 30 tests "interprétables", soit 35 tests mis en place, dans chacune des 3 grandes régions géographiques suivantes : Savanes – Kara – Centrale. La mise en place de ce dispositif nécessitera l'implication de personnels de terrain de la SOTOCO.

2.2. Limitation du processus d'acidification du sol.

L'objectif de l'essai proposé est d'évaluer différents modes de fertilisation minérale des systèmes cotonniers, sur leur capacité à limiter ou à enrayer le processus d'acidification du sol. Il est proposé dans chacune des 3 régions Nord du Togo deux essais statistiques. Chaque essai (3 objets, 8 blocs) est constitué de 2 séries (1 série coton et 1 série céréale : maïs ou sorgho). Chaque essai est implanté pour une durée de 5 ans. Une superficie de 2400 m² (24 parcelles élémentaires de 5 lignes de 25 m par essai) sera nécessaire pour chacune des séries de l'essai.

Les principaux éléments du protocole figurent en annexe 3.

Les 3 traitements comparés dans l'essai sont :

- FV : fumure vulgarisée sur chacune des cultures de la rotation
- FN : fumure à réaction neutre composée d'engrais simples apportant les mêmes quantités d'éléments fertilisants (NPKSB) mais non acidifiante
- FV+dolomie : fumure vulgarisée + amendement d'entretien sur la base de 2.8 kg de dolomie par kg d'azote apporté par la fumure.

Des prélèvements de sols seront réalisés à l'implantation et après cinq ans de culture pour évaluer l'évolution du complexe d'échange sur chacun des objets en comparaison. Les calendriers culturaux et les densités sont enregistrés sur ces essais.

2.3. Entretien du statut organique du sol.

Les études proposées visent à caractériser la matière organique du sol et ses fonctions, selon les différentes sources d'apports organiques. Cette caractérisation concerne :

- le coefficient de transformation des apports organiques (résidus de culture, biomasses végétales : jachères, plantes de couverture, fumures organiques : fumiers, terres de parc, composts) en matière organique du sol (coefficient iso-humique K_1 du modèle Hénin Dupuis),
- la contribution du carbone du sol issu des différents types d'apports organiques à la capacité d'échange cationique en fonction des fractions granulométriques de la MOS,
- les déterminants (climatiques, pédologiques, techniques culturales ...) de la minéralisation annuelle de la matière organique su sol (coefficient K_2 du modèle Hénin Dupuis),
- la minéralisation différentielle des fractions de la matière organique du sol.

Cette caractérisation devrait intégrer l'extrême diversité des systèmes cotonniers pratiqués d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Cette diversité concerne :

- les sources de carbone : nature des biomasses apportées (jachères naturelles, plantes de couverture, engrais verts, résidus de culture, pailles de graminées de "brousse"), les types d'apports organiques (fumiers, terres de parcs, composts ...) et leur mode d'élaboration,
- les modes de restitution au sol de ces apports : enfouissement, mulch, paillage, passage des troupeaux dans la parcelle, brulis ...
- les techniques culturales susceptibles d'influer sur les processus d'humification (conditionnement mécanique des résidus organiques, litières ...) et de minéralisation (utilisation d'herbicides, travail du sol ...)
- les principaux types de sols dans les principales zones climatiques.
- les flux de carbone entre les domaines agricole, sylvicole et pastoral à l'échelle de territoires villageois.

Ces études devraient permettre de définir une stratégie de gestion durable de la fertilité des sols dans les zones cotonnières d'Afrique sub-saharienne. En effet, les contraintes économiques actuelles (notamment les coûts des engrais minéraux / prix du coton) et la pression sur le foncier dans certaines zones, rendent irréalistes aussi bien le maintien de la fertilité des sols par des périodes de mise en jachère des sols, que la durabilité de systèmes de culture continue avec pour seuls apports minéraux les maigres quantités d'engrais minéraux que le contexte économique permet. Il convient d'évaluer de façon objective, sur ce critère de durabilité, toutes les initiatives en matière de gestion de la fertilité des sols à une échelle régionale. Face à la nécessité d'innover dans ce domaine, il est possible que l'on soit amené à préconiser une stratégie d'alternance de cycles de culture pendant lesquels un "investissement " dans le carbone du sol est réalisé en limitant la minéralisation de la MOS (cf. le rôle régénérateur de la jachère, et de certains systèmes de culture en non travail du sol), avec des cycles de culture pendant lesquels la durée de "valorisation" de l'investissement carbone est prolongé par une gestion "raisonnée" des résidus de culture (restitution directe ou par l'intermédiaire des étables fumières et des parcs d'hivernage).

L'ampleur des programmes de recherche à mettre en œuvre et l'importance des enjeux à l'échelle régionale méritent que le CORAF se saisisse de la question à travers l'aide au montage puis au portage d'un tel projet auprès de bailleurs de fonds.

2.4. Contours d'un travail de thèse en "économie environnementale".

La mission propose d'articuler un travail d'analyse et de synthèse de résultats sur les systèmes de culture mis en place dans les années 60-70 (analyse diachronique), avec un travail de suivi de systèmes de culture en milieu paysan (analyse synchronique), afin de permettre une estimation du niveau de fertilité à l'équilibre et d'évaluer les "coûts" correspondant pour atteindre ce niveau de carbone à l'équilibre dans les sols pour les systèmes de culture les plus pratiqués au Togo.

Parmi les contributions des recherches cotonnières togolaises au projet évoqué précédemment, figure l'analyse des états d'équilibre du taux de carbone dans les sols auxquels conduisent un certains nombre de systèmes de culture mis en place

dans les années 60 et 70 sur différents points d'appui du Nord Togo. Il s'agit en particulier :

- de l'essai jachère de Toaga mis en place en 1967 et conduit selon le protocole initial jusqu'en 2003,
- du système de culture en traction bovine mis en place à Tchamba en 1977,
- des systèmes de culture mis en place à Elavagnon, Dalanda, Kabou et Dapaon en 1977.

Des analyses de sols ont été réalisées sur ces dispositifs en 77-78 et jusqu'en 1986 pour la plupart, 1991 pour l'essai de Toaga. On dispose ainsi de l'évolution des caractéristiques chimiques du sol au cours des 10 premières années de mise en place de ces systèmes de culture, il conviendra de compléter ce référentiel par le même type d'analyses de sols en 2007 (soit une centaine d'échantillons de sol) pour avoir cette évolution 20 ans plus tard. Un pas de temps d'une trentaine d'années permet en effet d'estimer de façon relativement fiable les paramètres d'un modèle simple d'évolution du carbone dans les sols comme le modèle Hénin Dupuis.

Par ailleurs, de nombreux tests en milieu paysan (blocs dispersés) ont fait dans le passé l'objet de prélèvements de sols, la mise en relation des résultats agronomiques de ces tests avec les analyses de sols effectuées devraient permettre d'établir la relation entre niveau de carbone dans le sol et potentiel de production dans les conditions du Nord Togo.

Dans le cadre de son travail de thèse l'étudiant suivra aux plans technique et économique, pendant 2 campagnes agricoles des exploitations cotonnières qui conduisent des systèmes de culture diversifiés quant à la gestion des résidus de culture et des biomasses en général. Ce suivi doit permettre (i) d'évaluer les coûts de production et (ii) d'estimer à l'aide du modèle Hénin Dupuis paramétré grâce aux données expérimentales, le niveau attendu du carbone du sol à l'équilibre dans ces systèmes.

Un tel travail de thèse devrait permettre de fournir à SOTOCO les éléments d'un positionnement stratégique quant aux systèmes de culture à privilégier pour leur caractère plus durable.

Un appui à ce travail de thèse pourra être apporté sur les aspects science du sol par un agronome CIRAD basé à Cotonou, et sur les aspects économie de l'environnement par un économiste CIRAD basé à Bamako. Il suffira que les coûts marginaux liés aux déplacements de ces chercheurs soient pris en charge. Des éléments budgétaires de l'encadrement de ce travail de thèse sont présentés en annexe 5 de ce rapport.

Conclusions :

Il y a à l'évidence dans le domaine de la fertilité des sols, une réelle opportunité de relance du partenariat entre le programme coton de l'ITRA CRA_SH et le CIRAD. Cette relance pourrait se concrétiser à court terme à travers le travail d'un étudiant togolais en thèse qui reste à identifier et par le montage d'un projet régional sur la fertilité des sols en zone cotonnière.

Ce partenariat pourrait être élargi à brève échéance dans d'autres domaines de recherche dans le cadre de projets régionaux (FSP mobilisateur) qui devraient voir le jour en 2007, notamment dans le domaine de la protection phytosanitaire du cotonnier et de la biosécurité liée à la culture de cotonniers transgéniques. Il est important que le programme coton du CRA_SH, inscrive des activités de recherches dans des projets de ce type de façon à favoriser les échanges entre scientifiques d'un même domaine de recherches.

Il est essentiel également pour le déroulement de la carrière des jeunes chercheurs de la station de Kolokopé, qu'ils puissent bénéficier de formations en biométrie et sur l'utilisation des outils statistiques récents. Certaines de ces formations peuvent être assurées par le CIRAD.

La contrainte la plus urgente à lever pour une activité "normale" de recherche et pour rendre les conditions d'une vie attractive sur la station, concerne l'alimentation électrique. La connexion au réseau national de distribution est sans doute l'option à privilégier.

Annexe 1 : Calendrier et déroulement de la mission.

Mardi 24 : Arrivée à Lomé (AF 848).
Accueil de MM. Bonfoh et Pocanam.

Mercredi 25 : Visite au SCAC.
Réunion à la Direction de l'ITRA.
Liaison Lomé – Atakpamé.

Jeudi 26 : Station de Kolokope – séance de travail avec M. Tchagodomou

Vendredi 27 : Visite à la SOTOCO
Séance de travail Station de Kolokope
Réunion avec les chercheurs du programme coton

Samedi 28 : Visite du Point d'Appui d'Elavagnon

Dimanche 29 : Liaison Atakpamé – Kara
Visite du P.A. de Dalanda
Visite du P.A. de Kabou

Lundi 30 : Liaison Kara –Dapaon
Visite du PA Fosse aux lions
Visite du PA Toaga

Mardi 31 : Liaison Dapaon – Lomé

Mercredi 1 : Préparation restitution.

Jeudi 2 : Restitution au Chef de Service SCAC.
Réunion de Restitution à la Direction Générale de l'ITRA.
Départ sur Paris.

Annexe 2 : Quelques références bibliographiques des études et expérimentations sur la fertilité des sols.

Observatoire de la fertilité au Nord Cameroun : Evolution de la fertilité des sols du bassin de la Bénoué 2004 (C.Fesneau, mémoire de DEA).

Evolution de la matière organique et de la capacité d'échange cationique des alfisols tropicaux cultivés. H. Guibert, 1999.

Effets de jachères agroforestières sur les propriétés d'un sol ferrugineux et sur la production céréalière Harmand, J.M., Njiti C. F. 1998 . - p.21-31 , Français In : Agriculture et Développement (1998) n°18

Expérimentation des systèmes de culture dans les pays tropicaux. Cas des zones cotonnières d'Afrique noire M.Cretenet 1994 . - p.125-130 , Français In : Recherches-système en agriculture et développement rural. Symposium international /Sébillotte M. (ed.); AFSRE; CIHEAM; CIRAD; CNEARC; GRET; INRA; ORSTOM. - Montpellier : CIRAD-SAR, 1994/11. - vol.1

Fertilité et fertilisation dans la région sud du Mali : du diagnostic au pronostic. Crétenet M., Dureau D., Troré B., Ballo D., 1994. *Agriculture et Développement*, n. 2, p. 4-13.

Rapport de mission d'appui au Projet Mali Sud III (FAC). M.Cretenet 1993.

La gestion des résidus organiques à la ferme1991 . - p.293-315, Français In : Savanes d'Afrique, terres fertiles? Piéri C. (ed.). - Paris : Ministère de la coopération, 1991

Evaluation et diagnostic de la fertilité. Projet Garoua 1991 (H.Suzor & al.).

Stratégies paysannes et innovations techniques pour une agriculture en difficulté. Poissongui un village du Nord Togo. Faure G., Jallas E., Djagni K. 1990. Coton et Fibres Tropicales vol.45, fasc.1. pp 5-25.

Fertilité des terres de Savanes : bilan de trente années de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. C.PIERI 1989.

La fertilité des sols et son évolution en zone cotonnière du Tchad. Richard, L. Djoulet, B. 1985 21p. Français In : Coton et Fibres Tropicales. Série Documents, Etudes et Synthèses. - (1985) n°6

La fertilité des systèmes culturaux à base de cotonnier en Côte d'Ivoire. Neuf années d'expérimentation et d'observations multilocales (1973-1982) Sément, Gérard 1983 . - 40 p. - (Coton et fibres tropicales).

Annexe 3 : Eléments de protocoles

"Tests d'évaluation des déficiences minérales"

35 tests dans chacune des 3 régions : Savanes – Kara - Centrale

Observations et suivi :

- Chaque test compare 5 objets :
  - FP : fumure pratiquée par le paysan sur l'ensemble de sa parcelle.
  - FP+K : FP + 50 kg/ha KCl (ou K_2SO_4)
  - FP+K+Mg : FP + 50 kg/ha KCl (ou K_2SO_4) + 50 kg/ha Kiésérite
  - FP+K+Ca+Mg : FP + 50 kg/ha KCl (ou K_2SO_4) + 100 kg/ha dolomie
  - FP+FO : FP + 5 T/ha de terre de parc.

- Chaque parcelle élémentaire du test est constituée de 10 lignes de 25 m (200 m²)
- Une pancarte indiquant l'objet est placée en face de chaque parcelle élémentaire du test.
- La fumure organique est apportée à la levée dans les interlignes de l'objet correspondant.
- L'engrais en complément de la fumure apportée par le paysan est appliqué par ligne environ 50 jours après la levée (début floraison). L'engrais est enfoui après épandage.
- Le calendrier cultural est enregistré : date du labour, date du traitement herbicide, date de semis, dates et doses d'apport des engrais, date du premier sarclage, nombre de sarclages, date du premier traitement insecticide, nombre de traitements insecticides.
- Les symptômes foliaires de déficiences en K et Mg (se référer aux planches photographiques) seront notés sur chaque objet à 100 jours après semis.
- Récolte et pesée des 6 lignes centrales de chaque parcelle élémentaire. Une étiquette précisant l'identification du test et le nom de l'objet correspondant est placée dans chacun des sacs de récolte.
- Récolte séparée de la ligne 2 de chaque parcelle élémentaire : comptage des plants présents, comptage du nombre de capsules récoltées et pesée. Prélèvement d'un échantillon de coton graine (# 300 g).

"Essai acidification du sol"

2 essais en séries sur chaque site dans chacune des 3 régions : Savanes – Kara – Centrale. 2400 m² par série : 1 série coton, 1 série maïs ou sorgho. La rotation est coton - maïs ou sorgho. Chaque année sur chaque site il y a un essai en coton et un essai en maïs ou sorgho. Chaque essai est implanté pour une durée de 5 ans.

Observations et suivi :

- Chaque essai compare 3 objets (FV, FN et FV+dolomie) dans un essai blocs à 8 répétitions. Chaque parcelle élémentaire est constituée de 5 lignes de 25m (interligne de 0m80).
- Un prélèvement de sol (horizon 0-20 cm et 20-40 cm) est réalisé en année 1 pour chacune des séries. Chaque échantillon pour analyse correspond au

mélange de 10 prélèvements réalisés sur les 2 diagonales de chacune des séries.

- En année 5 un prélèvement de sol (horizon 0-20 cm et 20-40 cm) sera réalisé sur chacun des 3 objets en comparaison. Chaque échantillon de sol correspondra au mélange de 8 prélèvements de terre réalisés dans chacune des 8 parcelles élémentaires de chacun des objets.
- Le calendrier cultural est enregistré : date du labour, date du traitement herbicide, date de semis, dates d'apport des engrais, date du premier sarclage, nombre de sarclages, date du premier traitement insecticide, nombre de traitements insecticides.
- L'engrais est appliqué par ligne dans un petit sillon environ 10 jours après la levée. L'engrais est enfoui après épandage.
- Les éventuelles symptômes foliaires de déficiences en K et Mg sur coton (se référer aux planches photographiques) seront notés à 100 jours après semis.
- A la récolte du coton : comptage du nombre de graines de chacune des capsules de 5 plants de chaque parcelle élémentaire. Pesée du coton graine de chaque plant et calcul du PMC pour chacun des plants.
- A la récolte sur coton sorgho et maïs : comptage des plants présents sur la ligne centrale de chaque parcelle élémentaire.
- Sur coton sorgho et maïs : récolte et pesée des 3 lignes centrales de chaque parcelle élémentaire. Une étiquette précisant le numéro de la parcelle élémentaire et le nom de l'objet correspondant est placée dans chaque sac de récolte.

Composition fumures série coton :

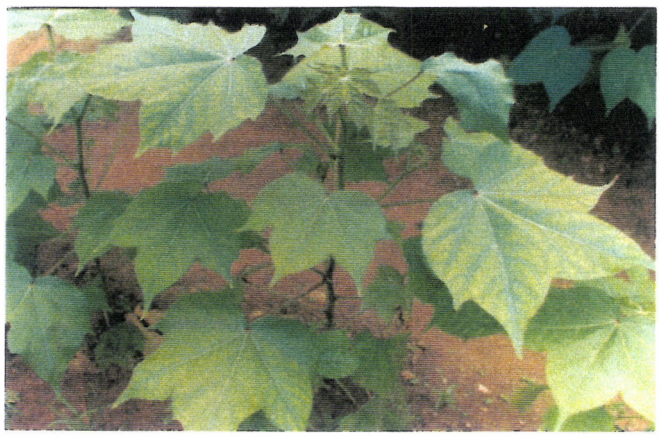
Objet	Engrais	Dose (kg/ha)	Dose / ligne 25 m (g)
FV Fumure Vulgarisée	12.20.18.5.1 Urée (floraison)	150 50	300 g 100 g
FN Fumure Neutre	Urée Super Simple Triple Super KCl Boracine Chaux Urée (floraison)	39 62.5 42 45 11 52 50	80 g 125 g 85 g 90 g 20 g 105 g 100 g
FV + dolomie Amendement entretien	12.20.18.5.1 Dolomie Urée (floraison)	150 115 50	300 g 230 g 100 g

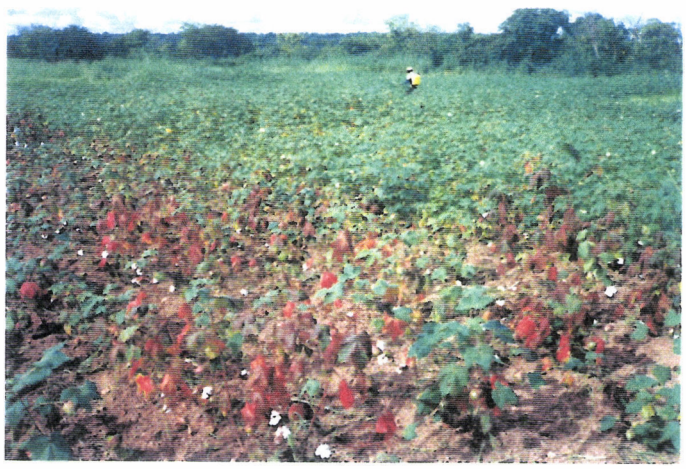
Composition fumures série maïs :

Objet	Engrais	Dose (kg/ha)	Dose / ligne 25 m (g)
FV Fumure Vulgarisée	15.15.15 Urée	150 50	300 g 100 g
FN Fumure Neutre	Urée Triple Super KCl Chaux	99 50 37.5 80	200 g 100 g 75 g 160 g
FV + dolomie Amendement entretien	15.15.15. Dolomie Urée	150 127 50	300 g 255 g 100 g

CIRAD-DIST Unité bibliothèque Lavalette

Annexe 4 : Symptômes des déficiences minérales K et Mg.





Annexe 5 : Eléments budgétaires de l'appui au programme de thèse en alternance.

		Année 1	Année 2	Année 3
Bourse thésard	déplacement LOME/MPL Frais de séjour	p.m.	p.m.	p.m.
Equipement	Ordinateur portable		p.m.	
Fonctionnement	Accueil labo MPL	583 €	583 €	1166 €
	Analyses sols	2500 €		
	Documentation	p.m.	p.m.	p.m.
Appuis CIRAD				
Science du sol	Déplacement (/ Cotonou)	250.000 CFA	250.000 CFA	250.000 CFA
	Frais de séjour (10j/an)	650.000 CFA	650.000 CFA	650.000 CFA
Economie	Déplacement (/ Bamako)	350.000 CFA	350.000 CFA	350.000 CFA
	Frais de séjour (10j/an)	650.000 CFA	650.000 CFA	650.000 CFA
	Total CFA	3 920 000 CFA	2 280 000 CFA	2 665 000CFA
		8 865 000 Francs CFA		