

*THESE*

*présentée à*

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

*pour obtenir*

LE GRADE DE DOCTEUR INGENIEUR

*Mention: Sciences agronomiques*

*par*

M. Dominique MASSE

AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES SOLS  
DEGRADES EN VUE DE LEUR REHABILITATION.  
CAS DES VERTISOLS DU NORD-CAMEROUN.

*Soutenu le 14 février 1992 devant le jury composé de :*

MM. REVEL, Président  
BOURGEAT  
FLORET  
PEDRO  
PONTANIER

# SOMMAIRE

	page
<b>SOMMAIRE</b>	2
<b>AVANT PROPOS</b>	3
<b>RESUME</b>	5
<b>ABSTRACT</b>	6
<b>Chapitre I. INTRODUCTION.</b>	7
<b>Chapitre II. CONTEXTE REGIONAL ET MATERIEL ETUDIE.</b>	15
<b>Chapitre III. METHODES EXPERIMENTALES ET PROTOCOLE D'ETUDE.</b>	47
<b>Chapitre IV. AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES TERRES DEGRADEES. RESULTATS DE DEUX ANNEES D'EXPERIMENTATION.</b>	66
<b>Chapitre V. MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE DES VERTISOLS DEGRADEES.</b>	125
<b>Chapitre VI. AMENAGEMENT DES SOLS "HARDES" ET DES VERTISOLS DEGRADEES AU NORD-CAMEROUN.</b>	147
<b>Chapitre VII. CONCLUSION GENERALE.</b>	162
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	167
<b>LISTE DES FIGURES</b>	177
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	181
<b>TABLE DES MATIERES</b>	183

## AVANT PROPOS.

*Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut de Recherche Agronomique du Cameroun (IRA), la Communauté économique et européenne (CEE DGXII), l'Institut de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM, France) et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, France). Un programme de recherche a ainsi démarré en 1989 sous l'intitulé "Réhabilitation des terres marginales au Nord Cameroun".*

*Je remercie donc vivement l'ensemble des acteurs qui ont participé scientifiquement et financièrement à l'élaboration et à la réalisation de ce projet.*

*Je m'adresserai dans un premier temps à l'ensemble des responsables de l'IRA; MM. AYUK TAKEM, BINDZI TSALA et MOUKOURI KUOH, respectivement à l'époque directeur de l'IRA, chef et chef adjoint du Centre National des Sols du Cameroun.*

*Les recherches ont été menées au sein de l'antenne du Centre National des Sols de Maroua. Mes remerciements iront donc sans commune mesure à l'ensemble de l'équipe qui m'a accueilli et contribué à conserver un souvenir indélébile des deux années passées à leur côté.*

*Je citerai en premier lieu, M. SEINY BOUKAR, pédologue et chef d'antenne, dont les compétences furent un sérieux atout pour l'accomplissement du projet. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.*

*Ce travail est le fruit d'une collaboration serrée avec MM. DONFACK et OUMAR, ainsi que MM. OBALE, TCHEUFFA, BOUBA, FELTOING, HAMADOU et ABDOU MOUSSA, et enfin YAO, YALLA et les paysans du village de Mouda ; ce mémoire est à ce titre en partie le leur, et constitue le témoignage à leur égard de ma profonde gratitude.*

*De même, que l'ensemble des chercheurs, techniciens et secrétaires du Centre de Recherche Agronomique (CRA) de Maroua reçoive mes plus vifs remerciements pour leur accueil, je pense plus particulièrement à M. BOLI, pédologue et chef de centre, ainsi que M. EYOG MATIG, actuellement chef de la station de recherche de Garoua.*

*Mon séjour au Cameroun fut encadré administrativement et financièrement par l'ORSTOM, j'exprime ma profonde reconnaissance envers M. CORNET, directeur du département "Milieux et Activités Agricoles", M. PONTANIER, chef de l'unité de recherche "Dynamique des milieux arides", et M. MATHIEU, alors chef de mission ORSTOM au Cameroun.*

*A Maroua, Mme DELNEUF, archéologue, M. TOURNEUX, linguiste, MM. SEIGNOBOS et IYEBI MANDJECK, géographes, tous chercheurs en titre ou associés de l'ORSTOM, m'ont apporté un soutien autant scientifique que moral, qu'ils en soient sincèrement remerciés.*

*La rédaction de ce rapport a été réalisée au Centre Louis Emberger (CNRS) à Montpellier. Je suis reconnaissant à M. WAREMBOURG, directeur, de m'y avoir accepté. J'ai pu ainsi bénéficier de l'importante documentation du centre dont l'accès fut grandement facilité par Mme BONNET et son équipe de documentalistes. De même, je pense à l'équipe des dessinateurs dirigés par M. VILLANOVA qui ont agrémenté ce*

*rapport de leur dextérité. Je remercierai plus particulièrement Mme GALAN et MM. FLORET, LE FLOC'H, ROMANE, GRANDJANNY pour leur accueil chaleureux au sein de leur équipe. Je pense enfin spécialement à M. ROUCHOUSE, animateur du Réseau Zone Aride, qui m'a gentiment accepté dans son bureau.*

*Il me faut maintenant remercier l'ensemble des chercheurs qui ont participé de près à la rédaction et à la correction de ce mémoire.*

*En premier lieu, mes plus vifs remerciements iront au Professeur BOURGEAT de l'Ecole nationale agronomique de Toulouse ; il fut mon initiateur à la pédologie et accepta de diriger cette thèse malgré ses multiples occupations. Je lui en suis particulièrement reconnaissant. Je lui associe son successeur, le Professeur REVEL, qui a accepté de présider le jury.*

*Je remercie le Professeur PEDRO qui m'a apporté ses conseils avisés et accepté de corriger ce rapport. Je pense également à MM. SERPANTIE, agronome, et SEINY BOUKAR qui n'ont pas manqué de me faire part de leurs critiques éclairées.*

*Je ne pourrais jamais assez remercier pour leur soutien constant MM. FLORET et PONTANIER, initiateurs et organisateurs du projet. Ils m'ont apporté non seulement leurs innombrables connaissances, mais également communiqué leur véritable passion pour la recherche ; que demander de plus pour l'encadrement d'un tel travail!*

*Je terminerai sous forme de dédicace à tous ceux qui ont de près ou de loin participé à l'élaboration de ce projet. Je pense ici particulièrement à mes parents qui, en plus de leur présence affective, ont été souvent les principaux "mécènes" de mes études au prix de bien des sacrifices. Je n'oublie pas également, qu'en qualité d'agriculteurs, ils ont été mes premiers professeurs en agronomie et en écologie et ont donc une grande part dans les connaissances que j'ai acquies.*

**RESUME :**

L'objectif de ce travail est d'étudier les moyens d'amélioration du régime hydrique de vertisols dégradés dans les régions semi-arides du Cameroun.

La dégradation des vertisols est caractérisée par un dysfonctionnement hydrique consécutif à des modifications structurales des horizons de surface. Les pratiques testées concernent des petits aménagements hydro-agricoles de type pitting, bandes alternées, microcatchment ou casiers, auxquels sont associées certaines façons culturales comme le labour ou le buttage.

Sur les sols fortement dégradés, appelés "hardés", le suivi de l'évolution des réserves hydriques du sol a montré que l'amélioration du régime hydrique était obtenue grâce à un travail du sol modifiant les aspects de la surface du sol. Toutefois, l'absence de macroporosité fissurale limite considérablement les circulations de l'eau dans ces sols riches en argiles de type smectite.

Concernant les vertisols moyennement dégradés, la conservation de la macroporosité fissurale est liée à des aménagements tels que les casiers, qui maintiennent une charge hydraulique élevée dans cette porosité et assurent une importante humectation en profondeur. La remise en culture de contre-saison de ces sols est alors largement favorisée. Par contre, pour une culture de saison des pluies, le drainage externe doit être privilégié, ce que ne permet pas le buttage.

Une meilleure compréhension du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés a permis de présenter une modélisation des termes du bilan hydrique, afin de simuler différentes conditions de pluviosité. Enfin, à partir de ces résultats et des expériences diverses réalisées sur les vertisols, l'auteur a proposé une réflexion sur la réhabilitation et l'aménagement des vertisols dégradés au Nord-Cameroun.

**Mots clés :** Vertisols, Nord-Cameroun, dégradation, réhabilitation, bilan hydrique, modélisation, aménagement des sols.

**ABSTRACT :**

This study addresses ways and means to ameliorate the soil water balance of degraded vertisols in the semi-arid zone of Cameroon. The degradation of vertisols is the result of an alteration of the topsoil structure which leading to a deterioration of the soil water regime. The methods tested include fine scale surface modifications such as pitting, alternate strips, microcatchment or gridwork of small ditches, associated with ploughing or earthing-up.

On strongly degraded soils, called "hardé", the evolution of the total quantity of soil water reserves showed that a slight water regime amelioration was obtained with ploughing which changed soil surface structure. However, in these soils rich in smectite clay, the lack of porosity due to deep cracks considerably restricted water penetration.

On intermediately degraded vertisols, the most important moistening in depth of soil is achieved with gridworks of ditches. Furthermore, the conditions about cracks conservation have been created by this type of treatment. In this case, the return of post rainy season cultivation was clearly suitable. For a rainy season cultivation, the external drainage must be privileged, that earthing up doesn't make.

Improved understanding of the water regime of degraded vertisols allowed the construction of a soil water balance model, to simulate other rainfall conditions.

Finally, the author presents some thoughts about rehabilitation and management of degraded vertisols in Northern Cameroon.

**Key words :** Vertisol, Northern-Cameroon, degradation, rehabilitation, water balance, modelization, soil management.

**CHAPITRE I.**

**INTRODUCTION.**

L'objet de cette recherche, concerne le fonctionnement et les possibilités d'amélioration du régime hydrique de sols dégradés de type "vertisolique", afin d'envisager une réhabilitation de terres considérées comme marginales dans les zones semi-arides du Nord-Cameroun

Les premiers inventaires des sols du Nord-Cameroun datent des années 1950 ; une synthèse pédologique concernant les sols et les ressources en terres a été réalisée par BRABANT et GAVAUD (1985). Plus récemment, des études faites dans la région de Maroua ont permis de caractériser les principaux systèmes écologiques représentatifs de la région, leur fonctionnement et la dynamique d'évolution du milieu (PONTANIER *et al.*, 1984 ; THEBE, 1987 ; CEE, 1988 ; SEINY BOUKAR, 1990 ; SEGHIERI, 1990). Tous ces auteurs ont souligné le problème de la dégradation des sols de cette région.

Une forme particulière de cette dégradation, que l'on rencontre souvent sur les sols de texture moyenne à fine est la "hardéisation". "Hardé" est un terme emprunté à la langue fulfuldé, et admis dans le langage courant des chercheurs de différentes disciplines. VAILLE (1970) le définit comme "tout terrain généralement à faible végétation arbustive et graminéenne, à très forte compacité et très peu perméable, sur lequel l'agriculteur sait qu'il ne tirera qu'une médiocre récolte". BRABANT et GAVAUD (1985) ont retenu ce type de milieu dans leur classification des contraintes et aptitudes des terres du Nord-Cameroun (unité 20). Ils estiment la surface de ces terres à environ 880000 ha et considèrent que 2 millions d'hectares sont potentiellement en danger.

Les phénomènes de dégradation se caractérisent par la diminution de la réserve utile du sol et de la profondeur maximale humectée, ainsi que par la baisse de l'efficacité des précipitations



dans la recharge des réserves hydriques du sol. Le résultat final est le dysfonctionnement du régime hydrique des sols. En ce qui concerne la végétation, on aboutit à une augmentation du stress hydrique. La dégradation des sols contribue donc à terme au déséquilibre des écosystèmes et à la baisse de fertilité du milieu (GAVAUD, 1971 ; SEINY BOUKAR 1990).

Les causes les plus souvent avancées sont d'ordre climatique, comme par exemple la baisse de la pluviosité, mais cette sécheresse climatique peut être accentuée par les formes édaphiques, au sens défini par FLORET et PONTANIER (1984). Ces formes sont souvent liées aux modalités de gestion du milieu par l'homme, synonymes en général, au cours de ces dernières décennies, d'une surexploitation des ressources agro-pastorales.

*Nous sommes donc en présence de vastes surfaces cultivées sporadiquement, voire abandonnées, en raison des faibles rendements et de l'irrégularité de la production d'où leur appellation de terres marginales (CEE, 1988). Se pose alors la question de la réversibilité de ces phénomènes, et des moyens de réhabilitation susceptibles de redonner à ces sols une productivité durable.*

La "restauration" a pour finalité de reconstituer totalement les propriétés écologiques originelles (BRADSHAW, 1987). Par contre, la "réhabilitation" consiste seulement à tenter de rétablir une partie des propriétés biologiques et physiques de l'écosystème d'origine(1). Par ailleurs, ALLEN (1988) considère que la "réhabilitation" permet éventuellement de rendre une utilité à un site qui ne correspond pas nécessairement à celle de l'écosystème initial. Sur le plan agronomique, l'objectif serait alors d'étudier les nouvelles propriétés de ces milieux et d'évaluer ainsi les possibilités d'exploitation de ces ressources, en y accommodant, le cas échéant, de nouvelles pratiques culturales ; ces dernières devant être conservatrices de l'environnement.

Notre travail, qui traite de la réhabilitation, se situe dans le cadre d'un programme de recherche plus vaste sur la dynamique des écosystèmes et de leurs réponses aux perturbations anthropiques. Les

---

(1) BRADSHAW (1987) considère que ces travaux de réhabilitation ou de restauration sont des techniques de recherche en écologie, permettant la critique des théories sur l'évolution des écosystèmes.

études, réalisées par une équipe de l'Institut de Recherche Agronomique du Cameroun, ont débuté en 1985 (CEE, 1988).

Dans une première phase, ces travaux ont permis de :

- cartographier les systèmes écologiques d'une zone test au 1/20000 (CEE, 1988) ;
- d'étudier le cycle de vie des espèces végétales spontanées et le partage des ressources hydriques de ces sols (SEGHIERI, 1990) ;
- de caractériser et de quantifier à différentes échelles le régime hydrique, le ruissellement et les pertes en sol des principaux systèmes écologiques (SEINY BOUKAR, 1990).

A partir de là, une réflexion sur la dynamique de la dégradation des sols et de la végétation a été le point de départ de nouvelles études sur l'utilisation et la réhabilitation des terres marginales.

*Les terres étudiées ici sont représentées par des vertisols et leurs faciès de dégradation.*

Deux raisons ont guidé le choix de ces milieux. D'une part, la nature vertisolique des sols est une composante commune à de nombreux écosystèmes représentés dans la province de l'Extrême Nord. D'autre part, BRABANT et GAVAUD (1985) considèrent les phénomènes d'érosion et de dégradation sur les vertisols très alarmants dans cette province.

De même, beaucoup d'auteurs ont noté la grande sensibilité des vertisols à la dégradation et à l'érosion, non seulement en Afrique (VIRMANI, 1988) mais aussi sous d'autres continents, comme en Inde (SWINDALE, 1988) ou en Australie (YULE, 1987). Ces deux dernières régions ont fait l'objet de nombreuses études sur l'aménagement et l'utilisation des vertisols en vue d'améliorer leur productivité (GARDNER *et al*, 1988 ; VIRMANI *et al*, 1985).

Concernant la conservation des vertisols, et à partir d'une discussion sur les composantes du bilan hydrique, YULE (1987) suggère une meilleure maîtrise des eaux de ruissellement ; la pratique la plus appropriée consistant à édifier des diguettes selon les courbes de niveau. Au Malawi, MITCHELL (1987) observe également des phénomènes de dégradation sur des vertisols exploités intensivement pour la production de coton. Il remarque notamment qu'en milieu cultivé, aucune précaution n'est prise pour maîtriser les écoulements de surface. En milieu naturel par contre, la présence d'une plante, *Lachaenum brachyatherum*, assure non seulement la couverture du

sol, mais limite également l'agressivité des pluies, ralentit et diffuse le ruissellement. L'auteur considère donc que la mise en culture doit obligatoirement s'accompagner d'un contrôle du ruissellement par des techniques culturales appropriées.

Au Nord-Cameroun, FLORET *et al* (1991) ont décrit différents faciès de dégradation des vertisols qui ont été observés le long d'une toposéquence (figure 1.1). Ces auteurs considèrent que *l'amélioration de l'efficacité des pluies dans la recharge hydrique est indispensable non seulement pour la régénération du milieu naturel mais aussi pour une réhabilitation des terres abandonnées par les paysans*. L'amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés passe par la limitation des pertes en eau par ruissellement, voire l'augmentation des quantités d'eau "infiltrables", le but étant de régulariser les disponibilités en eau pour les plantes.

C'est donc fort de l'acquisition de résultats obtenus par toute une équipe et pendant plusieurs années d'observations, que nous avons mis en place un projet de recherche sur la réhabilitation des terres marginales.

Jusque là, les travaux sur la réhabilitation des sols dégradés au Nord-Cameroun restaient limités en nombre et étaient surtout relativement récents.

HUMBEL (1965) a étudié l'influence du sous-solage et de la culture de cotonnier sur des sols halomorphes de type planosol. Ses observations ont porté sur la structure du sol, l'économie de l'eau, et l'enracinement du cotonnier. Il a montré que l'efficacité du sous-solage était limitée dans le temps.

Sur le même type de sols, GUIB (1976) a testé des aménagements en diguettes suivant les courbes de niveau. De bons rendements en riz ont pu être obtenus avec des variétés à cycle court.

Les autres travaux sur la réhabilitation concernent ceux du Centre de Recherche Forestière de Maroua. Les techniques utilisées sont relatives à l'agroforesterie (EYOG MATIG, 1989 ; PELTIER *et al.*, 1989). Les essais portent donc sur le comportement d'espèces ligneuses locales ou introduites, en fonction d'aménagements assurant une meilleure gestion du ruissellement (sous-solage, trouaison du sol, diguettes de retenue, fossés en anneau...). Ces essais conduits sur les sites de Salak et Aïssa Hardé sont effectués sur des sols proches des planosols, à horizons épais très

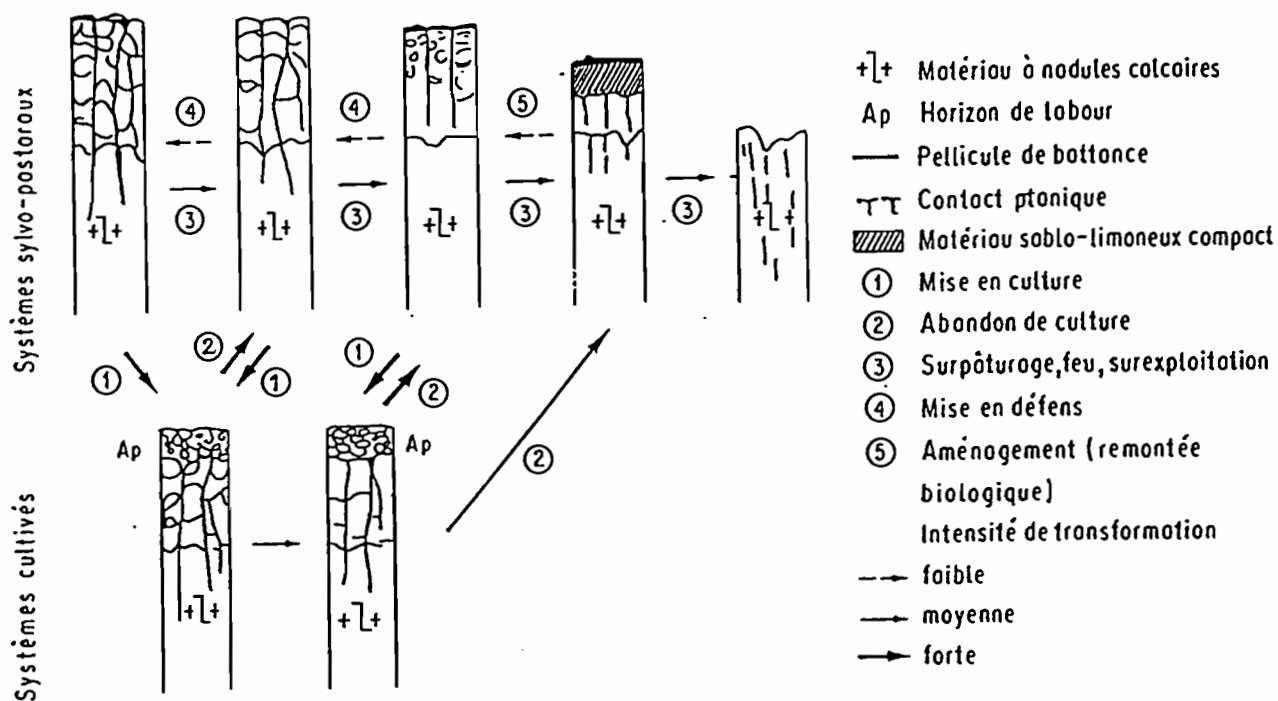


Figure 1.1 : Dynamique des systèmes écologiques d'une séquence vertisolique du Nord Cameroun (Mouda), d'après SEYNI BOUKAR (1990).

cohérents. Nous reviendrons sur les résultats obtenus par ces auteurs.

Cependant, notons dès maintenant, que les sols observés, bien que tous dénommés "hardé", n'ont pas forcément les mêmes caractéristiques morpho-pédologiques. Pour éviter toute confusion, il est donc important de relativiser les conclusions de l'ensemble des travaux de réhabilitation, anciens et à venir, en fonction du type de milieu observé. Cette précision est importante pour la détermination des moyens à mettre en oeuvre pour la réhabilitation des terres dégradées. Il convient également de considérer l'environnement socio-économique de la dégradation. En effet, SEIGNOBOS (*in press*) décrit différents types de "hardés" dont l'exploitation agro-pastorale diffère suivant les systèmes de production. *Des travaux de réhabilitation des terres marginales doivent donc tenir compte à la fois de la diversité des sols mis en jeu, mais également de leur utilisation passée ou future.*

Dans le cas des vertisols étudiés ici, deux stades de dégradation sont considérés ;

- les terres désignées par le terme "hardé", aux propriétés physico-hydriques particulièrement défavorables, doivent faire l'objet, dans un premier temps, d'une tentative de "réactivation biologique". Pour cela l'augmentation des réserves en eau du sol, concomitante à une augmentation des teneurs en matière organique, devrait redonner à ces sols des statuts leur permettant d'assurer une production agro-pastorale durable.
- le vertisol dit dégradé, stade intermédiaire de dégradation, fait l'objet, à l'heure actuelle, d'une mise en culture sporadique, tant en culture de saison des pluies qu'en culture de contre-saison. L'amélioration du bilan de l'eau dans ces sols doit donc aider à régulariser la mise en culture, en assurant l'adéquation des disponibilités en eau avec les besoins de la plante cultivée au cours de son cycle.

Par ailleurs, contrairement aux méthodes lourdes d'intervention des premiers travaux de réhabilitation de sols dégradés, des pratiques culturales et des petits aménagements hydro-agricoles réalisables par le paysan doivent ici être privilégiés (diguettes, casiers, labour attelé). L'objectif est de faire appel à une main d'oeuvre locale et à son savoir-faire basé sur l'utilisation d'outils connus (houe, charrue

attelée). Nous répondrons ainsi à un problème de coût, de rapidité et d'autogestion de l'intervention.

*Ce mémoire a pour objet de présenter les résultats des deux premières années d'observations sur l'amélioration du régime hydrique des vertisols plus ou moins dégradés, et s'inscrit ainsi dans le programme de recherche sur la réhabilitation des terres marginales.*

Nous chercherons à répondre aux deux questions suivantes :

- sur des vertisols dégradés sporadiquement cultivés, quels sont les moyens disponibles pour modifier le calendrier des disponibilités en eau du sol, afin de permettre une adéquation avec les besoins hydriques des différentes cultures?
- sur un stade de dégradation plus avancé, sol "hardé", quelles sont les pratiques permettant d'augmenter les quantités d'eau infiltrées, et dans quelle mesure ces dernières peuvent-elles être l'amorce d'une "réactivation biologique" de ces sols, pour un usage pastoral ou, à terme, une remise en culture?

Trois volets composent ce mémoire. Après avoir situé le contexte régional et décrit les différents sols étudiés, nous présenterons les pratiques d'aménagement testées et la méthode expérimentale (chapitres II et III). Nous pourrons alors aborder les résultats des deux années d'observations relatives à l'amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés (chapitre IV). La dernière partie nous amènera à réfléchir sur les possibilités d'étude de l'efficacité des aménagements à partir d'une modélisation des réserves en eau disponibles pour la plante, et nous poserons, avant de conclure, quelques principes pour l'aménagement des terres marginales au Nord-Cameroun (chapitres V et VI).

**CHAPITRE II.**  
**CONTEXTE REGIONAL**  
**ET**  
**MATERIEL ETUDIE.**

Le Cameroun, réputé pour sa grande diversité, présente plusieurs entités géographiques bien spécifiques. Cette diversité, souvent synonyme de complexité, s'inscrit dans le paysage physique, climatique et humain. Il apparaît donc nécessaire de caractériser le contexte régional de notre étude. Nous présenterons ensuite les principaux traits spécifiques des vertisols, qui constituent une des particularités pédologiques des régions arides et semi-arides de ce pays.

## **2.1. LES FACTEURS REGIONAUX DU MILIEU.**

Le Nord-Cameroun désigne les régions septentrionales du Cameroun, depuis les hautes terres centrales jusqu'au lac Tchad (figure 2.1). Le bassin versant de Mouda, où se situe notre étude, se trouve à 30 km au sud de Maroua, capitale administrative de la province de l'Extrême Nord. La zone géographique considérée est donc située entre le 10<sup>ème</sup> et le 11<sup>ème</sup> parallèle, région dont nous décrivons dans un premier temps les conditions climatiques. Nous nous consacrerons ensuite aux différents types de sols et à leur exploitation agricole et pastorale.

### **2.1.1. Les conditions climatiques.**

La province de l'Extrême Nord est concernée par deux types de climat ; la zone soudanienne à tendance sèche, et la zone sahéenne (OLIVRY, 1986). Cette dernière concerne les régions extrêmes comprises entre le 11<sup>ème</sup> et le 13<sup>ème</sup> parallèle. La saison sèche est longue avec six mois à pluviosité pratiquement nulle, deux tiers du total annuel des pluies sont concentrés en juillet et août. Au sud du 11<sup>ème</sup>, approximativement de Garoua à Maroua, le climat soudanien à



NORD du CAMEROUN :  
Le milieu naturel

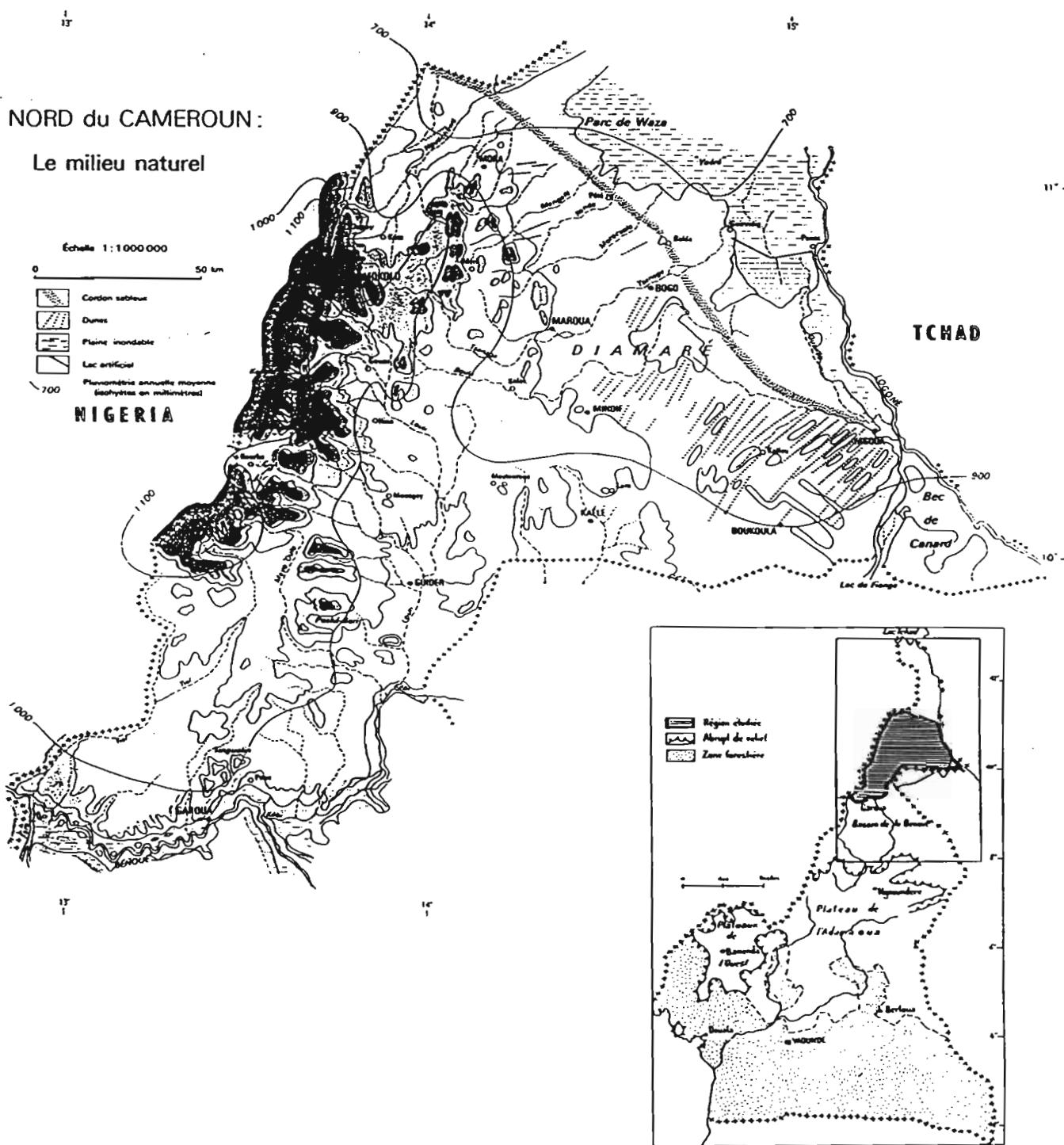


Figure 2.1 : Situation géographique du secteur d'étude (carte de l'Extrême Nord d'après BOUTRAIS *et al.*, 1984).

tendance sèche ou soudano-sahélien est caractérisé par une saison sèche qui dure 7 mois dont 5 avec une pluviosité nulle. Juillet et août concentrent plus de 50 % des pluies, mais les précipitations du mois de septembre sont encore assez abondantes.

Le tableau 2.1 donne les principales caractéristiques climatiques du climat soudanien à tendance sèche de la région de Maroua. Les données proviennent de la station météorologique de Salak, station la plus proche du bassin versant de Mouda.

Selon la carte de répartition mondiale des régions arides proposée par l'UNESCO (1977), la région de Maroua se situe dans l'aire semi-aride à sécheresse d'hiver dominante ( $P/ETP_{penman} = 0,44$ ), à hiver chaud (température du mois de janvier égale à  $24,9^{\circ}\text{C}$ ), à été très chaud (température du mois d'avril égale à  $30^{\circ}\text{C}$ ) et à 7 mois de saison sèche au sens d'AUBREVILLE (moins de 30 mm/mois) (PONTANIER *et al.*, 1984).

La pluviosité annuelle moyenne à Maroua-Salak est de l'ordre de 866 mm. Cette relative abondance ne rend pas compte des traits essentiels de la pluviosité du climat soudano-sahélien, à savoir des averses à hauteur et intensité pluviométriques élevées, ainsi qu'une forte variabilité annuelle et interannuelle.

La forme des pluies la plus fréquente est de type "tornade", caractérisée par des durées relativement courtes de l'averse avec de très fortes intensités (CASENAVE et VALENTIN, 1989). D'après les observations de KAISER sur la période de 1980 à 1984, PONTANIER *et al.* (1984) rapportent que, pour les averses supérieures à 3 mm :

- les intensités moyennes supérieures à 100 mm/h sont exceptionnelles (180 mm/h en 5 min) ;
- les intensités moyennes supérieures ou égales à 50 mm/h contribuent en moyenne à près de 20 % des hauteurs annuelles corrigées ;
- les intensités moyennes supérieures ou égales à 30 mm/h représentent 50 % des totaux annuels.

La variabilité d'ordre interannuelle provoque des périodes de sécheresse, parfois catastrophiques. Le tableau 2.2 donne la répartition statistique des pluies annuelles à Maroua-Salak (OLIVRY, 1986). La figure 2.2 représente l'évolution des pluviosités annuelles depuis 1947, relevées au poste Sodecoton de Maroua<sup>(1)</sup>. L'utilisation

---

(1) Sodecoton : Société de développement de la culture cotonnière au Cameroun.

Mois	Température °C			Pluviosité mm			Evaporation mm			P-ETP mm	Humidité relative %
	Min	Max	Moy	QuarS	Moy	QuarI	Piche	Colo.	ETPp		
JAN	32,7	16,9	29,9	0	0	0	466	233	147	-147	27,5
FEV	35,3	18,6	27,0	0	0	0	541	252	160	-160	17,5
MAR	38,5	22,3	30,8	1	4	0	628	316	194	-192	22,5
AVR	39,2	24,9	31,9	35	21	6	510	351	190	-174	34,5
MAI	37,6	24,3	31,0	75	63	33	394	285	190	-131	52,0
JUI	34,0	22,2	28,2	172	134	85	213	195	145	-40	65,0
JUI	31,6	21,7	26,6	242	216	159	135	161	130	+77	74,0
AOU	30,0	21,2	25,6	265	241	193	89	124	110	+145	79,0
SEP	31,5	20,9	26,2	185	157	28	92	132	125	+20	75,0
OCT	34,6	20,5	27,7	40	30	5	230	186	156	-129	59,0
NOV	35,1	19,0	27,1	0	0	0	393	249	153	-153	36,0
DEC	33,6	17,1	25,3	0	0	0	436	254	132	-132	30,5
AN			27,7		866		4117	2738	1832	-1016	48,0

(QuarS : quartile supérieure QuarI : quartile inférieure)

Tableau 2.1 : Caractéristiques climatiques principales relevées sur la station météorologique de Maroua-Salak (18 années d'observation) d'après OLIVRY(1986).

Nbre an.	P max	P med	P min	ET	Années humides		année moy.	IC +/-95%	Années sèches		Cv
					T=10ans	T=20ans			T=10ans	T=20ans	
18	1119	850	617	123	1040	1085	877	61	719	678	0,140

Tableau 2.2 : Répartition statistique des pluies annuelles à Maroua-Salak (OLIVRY, 1986).

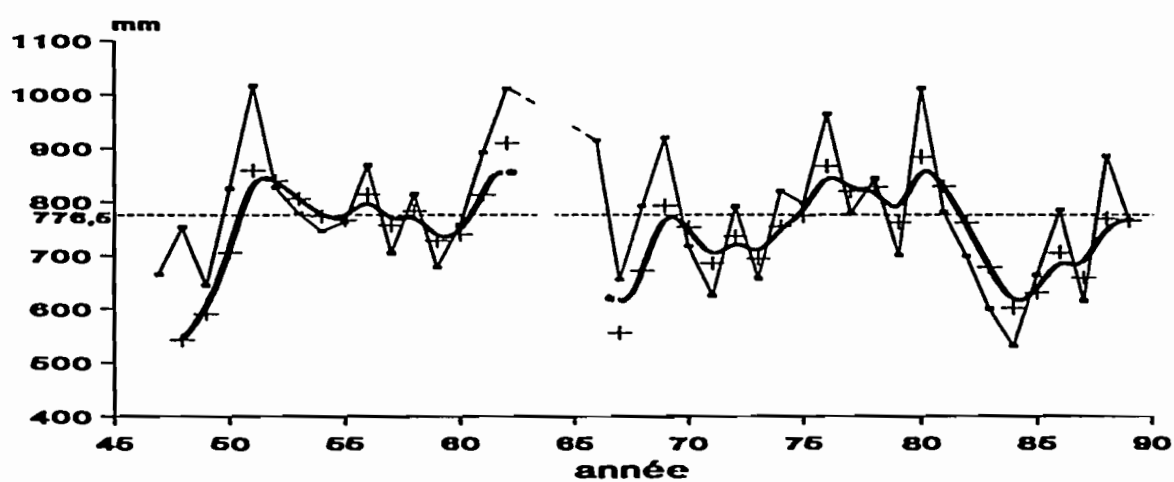


Figure 2.2 : Hauteurs précipitées annuelles (—) à Maroua de 1947 à 1989. La courbe (—) représente la tendance de l'évolution, obtenue par lissage des moyennes mobiles pondérées représentées par les points (+).

d'une moyenne mobile pondérée<sup>(1)</sup> fait apparaître deux périodes de sécheresse dans la région, de 1965 à 1975, et plus récemment de 1982 à 1989. La tendance de ces dernières années indique un rapprochement des hauteurs précipitées vers la moyenne générale.

La variabilité apparaît également sur d'autres paramètres comme les dates de la fin et du début de la saison des pluies, ou encore les probabilités de retour, en date et en durée, de périodes sèches au sein de la saison des pluies. Ainsi à partir d'une analyse des pluies journalières, réalisée sur 35 années de mesure au poste de Maroua-Agro, THEBE (1987) note que :

- la fin de la saison des pluies, marquée par la dernière pluie supérieure ou égale à 15 mm, a lieu une année sur cinq avant le 15 septembre, une année sur deux avant le 30 septembre, et une année sur cinq après le 15 octobre ;
- entre le 1 juin et le 30 septembre, il y a en moyenne une à deux périodes sèches de dix jours tous les ans, et de quinze jours au moins tous les trois ans, une période sèche étant caractérisée par une pluviosité inférieure à 10 mm.

La forte variabilité, inscrite dans les caractéristiques du climat soudano-sahélien, est en partie à l'origine des choix stratégiques retenus par le paysan : choix des cultures, des assolements, des rotations, dates des semis, dates des désherbages, et choix des façons culturales. La notion de risque climatique sur la production agricole se manifeste alors pleinement (ELDIN, 1989).

Cependant, l'incidence des données climatiques est partiellement modulée par les propriétés hydrodynamiques des différents types de sols, dont nous allons présenter les aspects généraux.

### **2.1.2. Les sols du Nord-Cameroun et leur utilisation.**

Les caractéristiques du milieu naturel apparaissent très diverses, ce qui se traduit par l'extrême hétérogénéité du milieu physique. Dans cette région, apparaît, en effet, la juxtaposition des trois grands ensembles morphologiques du Nord-Cameroun ; les montagnes et plateaux cristallins des monts Mandara, les surfaces horizontales des

---

(1) La moyenne mobile pondérée permet de visualiser une évolution générale et récente de séries chronologiques de paramètres climatiques. On considère que la variable d'une année donnée comprend une composante aléatoire et une composante prédéterminée par l'éventuelle variation cyclique, autrement dit, dépendant des valeurs des années antérieures (effet de persistance). La pondération la plus satisfaisante est obtenue en utilisant une forme exponentielle décroissante (OLIVRY, 1983 ; GROUZIS, 1988).

pénéplaines, et les plaines sédimentaires de la cuvette tchadienne (ROUPSARD, 1987).

### 2.1.2.1. Les principaux types de sols.

Les sols de cette province ont été étudiés à l'occasion d'études pédologiques à l'échelle 1/100000 (SEGALEN 1962 ; SIEFFERMANN 1963 ; MARTIN 1963 ; SEGALEN et VALLERIE 1963 ; BARBERY *et al.*, 1980), ou de synthèse (BRABANT et GAVAUD 1985). Ils présentent une grande diversité ; la classe des sols à sesquioxides est considérée comme le faciès climacique régional, bien que ceux-ci n'occupent pas les surfaces les plus importantes (HUMBEL, 1965).

En reprenant la synthèse de SEINY BOUKAR (1990), illustrée par la figure 2.3, on constate que les sols sont répartis dans cinq types de paysages :

- 1- *les sols squelettiques des paysages montagnards ; sols peu épais, lithosols et régosols plus ou moins lessivés à faciès variés (fersiallitiques et ferrugineux, localement à caractères vertiques) ;*
- 2- *les sols évolués des pédiments et glacis d'altération situés dans un paysage au relief adouci (pentes < 5 %) ; sols ferrugineux peu ou très différenciés, lessivés tropicaux, planosols à cuirasse résiduelle, planosols solodiques et solonetz, sols fersiallitiques rouges et bruns sur matériaux basiques (andésites, diabases...) et vertisols à faciès calcique ;*
- 3- *les sols peu évolués des glacis colluviaux ; sols peu évolués d'apport colluvial, modaux à faciès fréquemment lessivé, vertisols et sols ferrugineux tropicaux, ravinés sur les glacis terrasses ;*
- 4- *les sols exondés des alluvions anciennes ; sols peu évolués, d'apport éolien, lacustre ou alluvial, sols peu différenciés, et un ensemble de sols dégradés (sols lessivés, planosols et solonetz présentant souvent des caractères d'hydromorphie).*
- 5- *les sols des alluvions récentes et actuelles ; sols peu évolués sur apport sableux fins micacés et alluviaux, parfois éoliens, hydromorphes ou halomorphes, et des sols hydromorphes minéraux à argiles gonflantes de type 2:1.*

Les sols qui font l'objet de notre étude sont les vertisols, formés sur les glacis colluviaux. Nous reviendrons ultérieurement sur leur description spécifique.

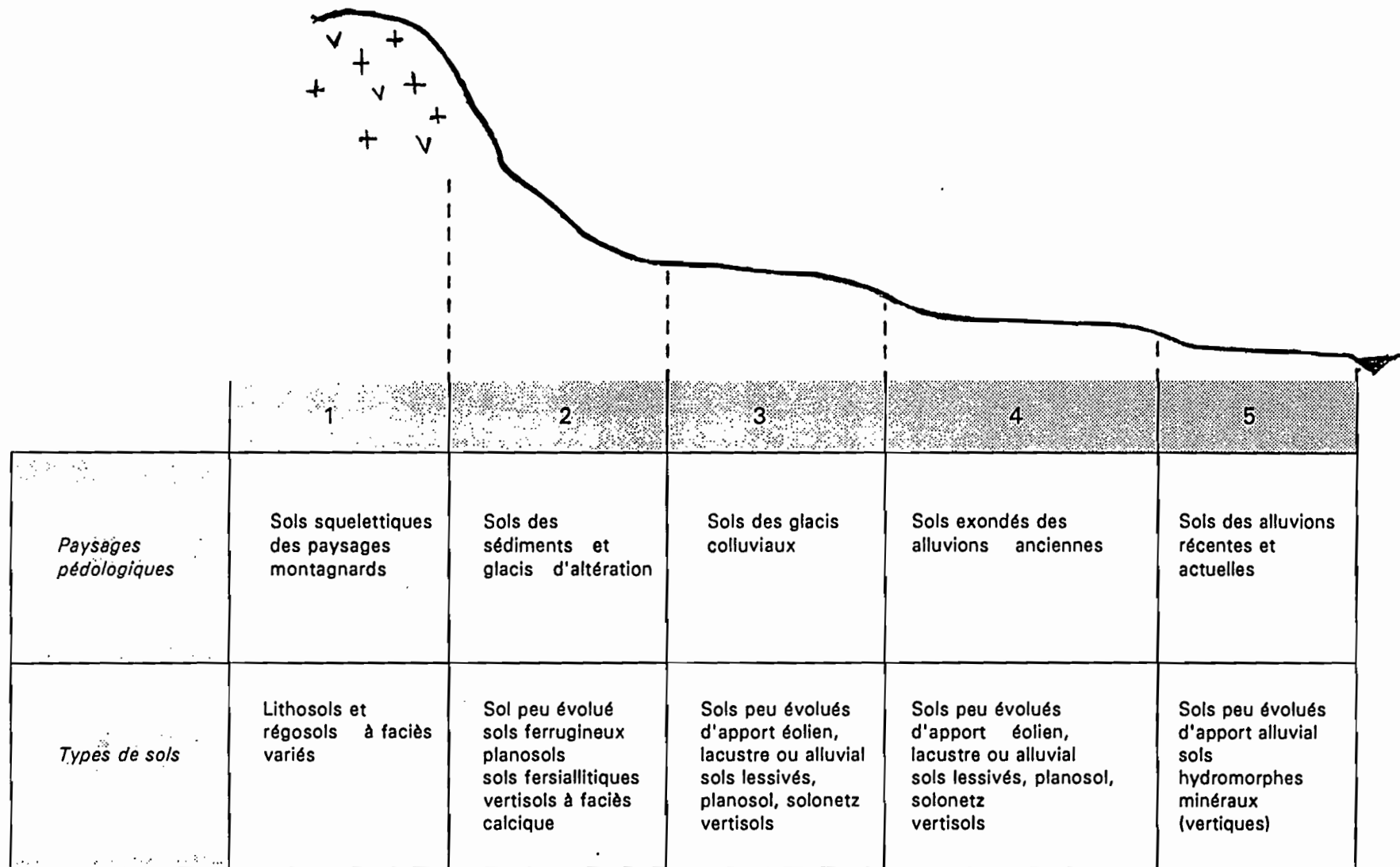


Figure 2.3 : Paysages pédologiques au Nord Cameroun d'après BRABANT et GAVAUD (1985) in SEINY BOUKAR (1990).

### 2.1.2.2. Erosion et dégradation des sols.

Selon BRABANT et GAVAUD (1985), l'érosion présente des risques à court terme pour les sols. Elle entraîne un déséquilibre entre la pédogénèse et la morphogénèse au profit de cette dernière. Deux phénomènes, liés à l'érosion, se distinguent, d'une part la dégradation des sols et d'autre part l'érosion mécanique.

La dégradation des sols consiste, plus précisément, en une modification des propriétés physiques des horizons supérieurs du sol sans entraînement mécanique apparent. Les caractéristiques en sont une perte de structure, la formation d'une couche battante en surface, une réduction de la perméabilité, une augmentation de la compacité, le manque d'aération, la limitation de l'enracinement. On assiste alors à un dérèglement du régime hydrique du sol et l'apparition d'un pédoclimat présentant une aridité accentuée (GAVAUD, 1971 ; FLORET et PONTANIER, 1984 ; BRABANT et GAVAUD, 1985 ; SEINY BOUKAR, 1990). Beaucoup de sols peuvent subir cette dégradation, seuls les sols très sableux et très perméables ou les sols très structurés (sols fersiallitiques par exemple) sont peu sujets à ces phénomènes. A cette dégradation, font suite en général des processus d'érosion mécanique des sols.

L'érosion mécanique implique un entraînement des substances solides par les eaux de ruissellement. Les glacis colluviaux y sont sensibles, à cause de leur modelé et des pentes qui accélèrent le ruissellement. Les pertes en terre sont par contre très réduites dans les grandes plaines sédimentaires. Les sols formés sur les pédiments du socle granito-gneissique ont déjà une faible épaisseur par nature et l'érosion hydrique peut provoquer un décapage jusqu'à la roche mère : c'est le cas notamment sur certains secteurs des monts Mandara et de leur piémont. D'autres manifestations spectaculaires se rencontrent sur les formations argileuses ou sablo-argileuses compactes, où l'on note de grandes surfaces décapées voire de véritables ravins profonds de plusieurs mètres (région de Kaélé).

Les causes de l'érosion et de la dégradation sont souvent liées aux propriétés intrinsèques des sols et de leur environnement pédogénétique, mais aussi aux problèmes de surexploitation du milieu par l'homme : déboisement, feux, pâturages intensifs, ou autres pratiques culturales. Les sols mis à nu sont alors soumis à l'agressivité des fortes pluies du début de saison pluvieuse (BRABANT et GAVAUD, 1985).



### 2.1.2.3. Disponibilité en eau et utilisation des sols.

Dans les zones arides et semi-arides, l'utilisation des sols est fortement conditionnée par la disponibilité en eau du sol ; ce facteur explique environ 50 % des fluctuations actuelles de la productivité et des potentialités agricoles (SICOT, 1989).

Cette disponibilité est fonction de la pluviosité, des propriétés physico-chimiques intrinsèques du sol et des caractéristiques pédo-climatiques définies par les quantités d'eau qui s'infiltrent et participent à la recharge du stock hydrique (CASENAVE et VALENTIN, 1989).

A partir des critères de différenciation physico-hydriques des sols, définis par FLORET et PONTANIER (1982), que sont la profondeur humectée, l'importance des réserves en eau totale et des réserves en eau disponible pour les végétaux, FLORET *et al.* (1991) regroupent les types de sols du Nord-Cameroun en deux classes distinctes ; *les sols argileux de la famille vertisolique* et *les sols ferrugineux à dominance sableuse*. Les principales caractéristiques de ces sols sont présentées dans le tableau 2.3.

La profondeur d'humectation est superficielle dans les sols argileux (40-50 cm) légèrement plus importante sur les vertisols modaux du fait de la présence des fentes de retrait, qui favorisent la pénétration des pluies (jusqu'à 70 cm). A l'opposé les sols ferrugineux s'humectent sur des profondeurs dépassant généralement les 150 cm.

En ce qui concerne les réserves maximales en eau disponible (Rd max), celles-ci sont 2 à 3 fois plus importantes dans les 40 premiers centimètres pour les vertisols modaux. Par contre, ces réserves sont équivalentes pour les 2 types de sols pour la tranche 0-80 cm, où elles atteignent en moyenne 60 mm ; les sols ferrugineux présentent un transfert plus important de l'eau par drainage en profondeur.

Les capacités de stockage potentielles sont cependant plus importantes sur les sols argileux, de 1,5 à 2,3 mm/cm suivant les faciès, par rapport aux sols ferrugineux (1 mm/cm).

Globalement les périodes de disponibilité de l'eau sont en moyenne plus tardives, mais plus importantes et plus durables sur les sols vertisoliques que sur les sols ferrugineux sableux, lesquels sont caractérisés par une disponibilité d'eau précoce mais de courte durée ; cette disponibilité est peu importante et instable surtout en début et en fin de saison des pluies (tableau 2.3).

Ces fonctionnements hydriques influent non seulement sur le comportement des végétaux en milieu naturel mais aussi sur la

	réserve utile Ru mm 0-80 cm	profondeur maximale humectée cm	réserve disponible max observée Rd mm		durée moy de la sécheresse édaphi- que absolue (mois)	
			0-40 cm	0-80 cm	0-40 cm	0-80 cm
vertisol modal Mouda	170/190	60/70	61,6	68,2	5	0
sol ferrugineux sur gneiss Mouda	70/80	>160	20,6	62,6	6	4
sol ferrugineux modal sur sable dunaire Mokyô	40/50	>180	34,1	58,4	8	7

Tableau 2.3 : Disponibilité en eau pour les principaux types de sols modaux au Nord Cameroun (*in* SEINY BOUKAR, 1990).

conception des itinéraires culturaux pratiqués par les agriculteurs, ainsi que sur l'exploitation pastorale de l'environnement.

Pour les vertisols modaux, la faible profondeur humectée crée une compétition pour l'eau entre les ligneux et les herbacées. Par contre, sur les sols ferrugineux, la redistribution verticale profonde de l'eau permet une complémentarité entre les deux types végétatifs, grâce à la stratification de l'exploitation racinaire (SEGHIERI, 1990). Ceci aboutit à une complexité des différents systèmes phyto-écologiques, liée également à une forte anthropisation du milieu (LETOUZEY, 1985).

Concernant la production agricole, les agriculteurs ont mis au point toute une stratégie pour limiter les risques de perte des récoltes ; lesquelles sont fortement influencées par les disponibilités en eau "erratiques" que présentent notamment les sols ferrugineux sableux, principaux sols exploités pour la production de céréales (sorgho, mil,...). Les techniques culturales, exclusivement manuelles, sont adaptées à la mise en valeur agricole de grands espaces dans un contexte d'aléas climatiques (MILLEVILLE, 1989)<sup>(1)</sup>.

Sur les sols argileux de la famille vertisolique, la culture de contre-saison constitue de vastes îlots de verdure persistante pendant la saison sèche. Cette production particulière profite des disponibilités qui se maintiennent au delà de la fin des pluies ; elle permet la mise en valeur de sols parfois inondés pendant la saison pluvieuse. Nous reviendrons ultérieurement sur cette culture.

Il faut également citer l'utilisation des sols dans les zones de montagnes, qui constitue un bel exemple d'intensification (BOUTRAIS *et al.*, 1984). L'exploitation des Monts Mandara est basée sur l'emploi de mesures antiérosives très strictes. L'édification de terrasses soutenues par des petits murets de pierres autorise la mise en culture de versants très abrupts, c'est une véritable leçon de conservation des ressources en eau et en sol. Bien qu'efficaces, ces systèmes de production n'en sont pas moins très fragiles, les terrasses demandent un entretien constant sous peine de voir apparaître une érosion intense (BOUTRAIS *et al.*, 1984 ; CEE, 1988 ; SEINY BOUKAR, 1990).

---

(1) Le délai entre la fin d'une pluie et le semis est ainsi extrêmement court, ce qui limite en partie les risques d'échec de mise en place de la culture.

L'extrême nord du Cameroun est donc caractérisé par une grande diversité pédologique. Elle se traduit par des comportements hydrodynamiques très différents selon les sols : une infiltration et une capacité de stockage de l'eau très variables, une redistribution de l'eau très inégale pour les plantes. La compréhension de tous ces phénomènes nécessite l'intervention de plusieurs disciplines, lors de la caractérisation des différents milieux édaphiques, ainsi que l'importance des processus hydro-pédologiques intervenant sur les réserves en eau du sol et leur utilisation par les végétaux. Les études menées sur le bassin versant de Mouda avec une approche globale écosystémique en sont un aboutissement (CEE, 1988).

Dans cette présentation succincte des sols du Nord-Cameroun, nous avons pu entrevoir la spécificité des vertisols, qui constituent le support pédologique de notre étude. Il convient donc de s'attarder sur leurs propriétés particulières et les phénomènes de dégradation qui leur sont propres.

## **2.2. LES VERTISOLS ET LEUR DEGRADATION.**

Les études sur la réhabilitation des terres marginales menées sur le bassin versant de Mouda se sont orientées sur les vertisols ; ces sols bien particuliers présentent d'importants phénomènes de dégradation. Avant de les décrire, nous aborderons quelques généralités, qui permettront de préciser la spécificité de ces sols.

### **2.2.1. Généralités sur les vertisols.**

Les vertisols s'étendent sur près de 257 millions d'hectares sur l'ensemble du globe terrestre. Les grandes concentrations, selon DUDAL (1965), apparaissent en Inde (72 millions ha), au nord de l'Australie (71 millions ha) et en Afrique Tropicale (104 millions ha)(figure 2.4). Ils constituent selon WILDING et PUENTES (1988) des ressources importantes, tant dans les pays développés que les pays en voie de développement.

Avant de préciser leur utilisation et les particularités de leur régime hydrique, il convient de rappeler les propriétés des vertisols et les quelques principes qui sont à la base de leur classification pédologique.

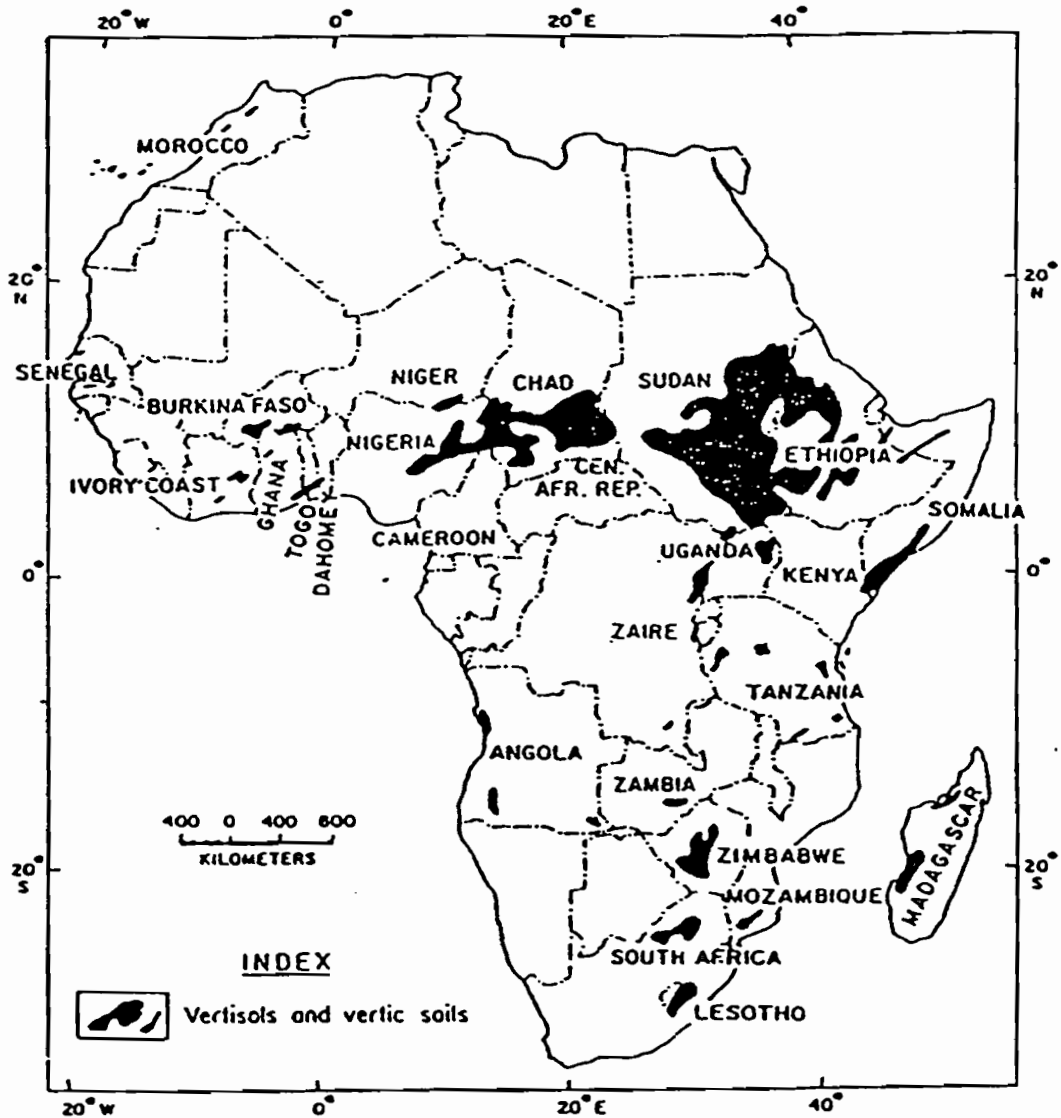


Figure 2.4 : Principales zones de vertisols et des sols vertiques en Afrique tropicale et subtropicale d'après DUDAL (1965).

### 2.2.1.1. Définition et classification des vertisols.

Les vertisols sont des sols argileux qui, suivant l'alternance des saisons sèches et humides, se rétractent et se gonflent. Il apparaît alors de larges et profondes fentes de retrait en période sèche et un microrelief de type "gilgai" (A.F.E.S., 1988 ; DUDAL et ESWARAN, 1988).

Ce sont des sols typiquement intrazonaux des zones à climat très contrasté et à saison sèche accentuée (DUCHAUFOR, 1965). Ils se développent dans des conditions de mauvais drainage local ou externe ; ce qui, sur le plan du pédoclimat, accentue les contrastes saisonniers du climat général (pluviosité et température). Ce contexte climatique et pédo-climatique détermine un degré d'altération hydrolytique très élevé, favorisant les mécanismes de néoformation des argiles (PEDRO, 1976). Par ailleurs, les roches mères sont riches en calcium et magnésium, cations indispensables à la néoformation d'argiles gonflantes.

La figure 2.5, d'après PODWOSJEWSKI (1988), résume les principaux facteurs de formation des argiles de type smectite et les conséquences de leur accumulation sur les principales caractéristiques des vertisols. on note ainsi :

- un brassage des constituants et donc un profil granulométrique homogène, composé d'argiles et de limons, les argiles présentes sont en majorité des smectites ;
- une forte différenciation structurale avec des prismes séparés en période sèche par de larges fentes de retrait, et une abondance de surfaces de friction (slickensides) ;
- l'existence fréquente de nodules calcaires sphériques de quelques millimètres de diamètre, provenant de la concentration d'éléments solubles (sulfates et carbonates) ;
- des faibles teneurs en matière organique de l'ordre de 1 à 2 %. Les humines néoformées contractent des liaisons physico-chimiques avec les argiles conférant en général une couleur noire ou gris olive à la masse du sol ;
- une capacité d'échange élevée de 40 à 100 meq/100 g de terre, liée à l'abondance des argiles ;
- une activité biologique faible due au contexte argileux compact.

La classification française distingue 2 principaux types de vertisols (A.F.E.S., 1988) :

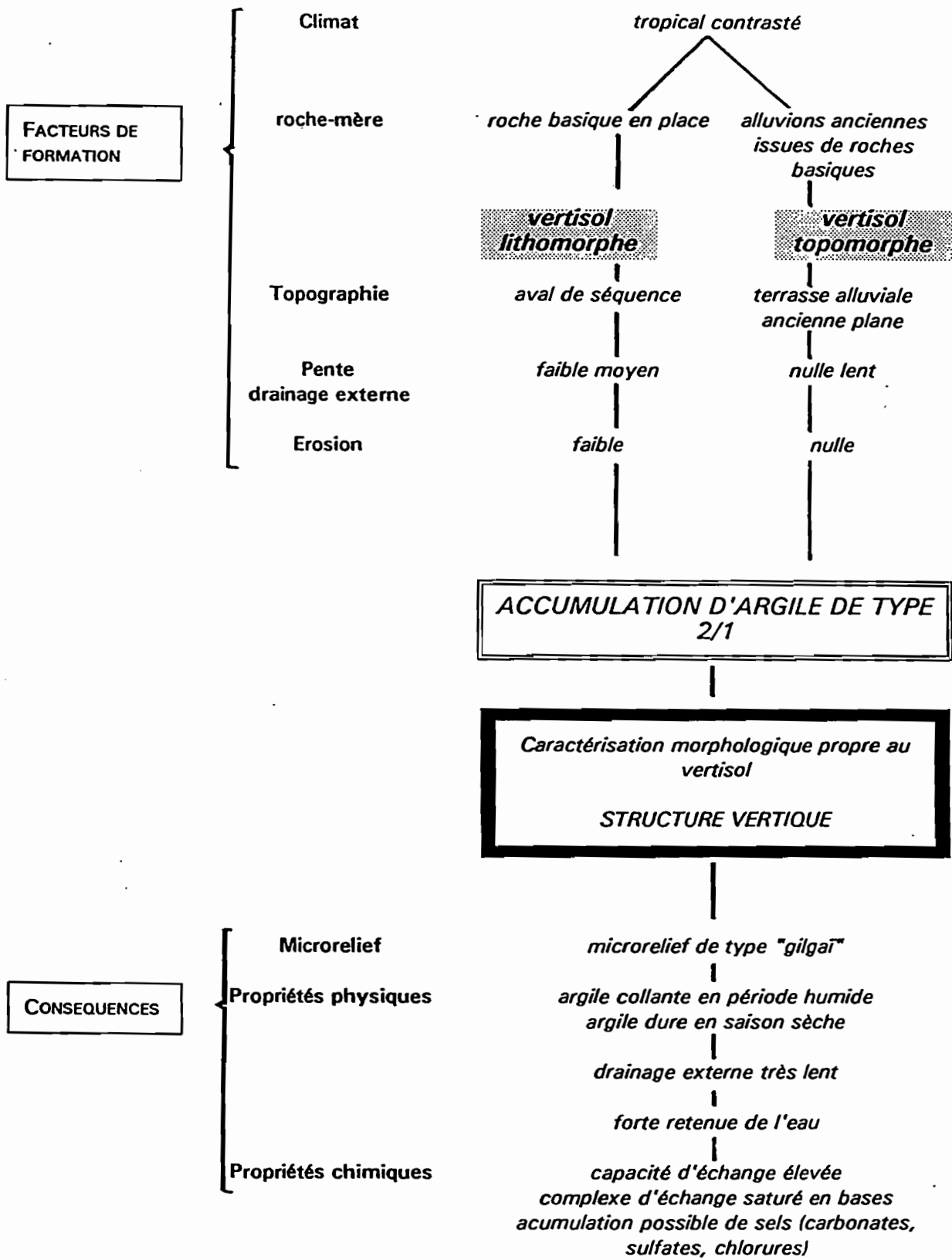


Figure 2.5 : Facteurs de formation d'argiles de type smectite et conséquences de leur accumulation d'après PODWOSJEWSKI (1988).

- les topovertisols, formés dans des cuvettes ou sur des zones plates : ils présentent un engorgement et une hydromorphie marquée, des matériaux primaires et secondaires carbonatés ou sulfatés ;
- les lithovertisols se situent en position d'interfluve dans des paysages ondulés. Ils sont issus de roches en place (basaltes, marnes, argiles) dont l'altération libère des argiles gonflantes. Ils montrent une certaine lixiviation des horizons supérieurs pendant les périodes humides. La pédoturbation rapporte en surface des matériaux riches en bases. Si elle n'est pas suffisante, le sol peut évoluer vers des planosols.

Ces deux types de vertisols, qui sont représentés au Nord-Cameroun (BRABANT et GAVAUD, 1985), sont résumés dans le tableau 2.4.

Comme nous l'avons vu précédemment, les vertisols lithomorphes sont toujours situés sur les versants ou des plateaux à pente faible. Le drainage externe lent est cependant normalement assuré, le drainage interne est nul à très lent et le sol, engorgé pendant la saison des pluies, ne se dessèche jamais complètement en profondeur, même en fin de saison sèche. MARTIN (1963) résume ainsi la description de la série Kaélé, série la plus étendue et la plus représentative de la carte pédologique au 1/100000 (feuille de Kaélé) :

" sous un horizon superficiel (2 à 4 cm) meuble et bien structuré, qui manque fréquemment, nous trouvons un horizon vertisolique typique de 50 à 75 cm d'épaisseur, à macrostructure prismatique, fentes de retrait et forte cohésion, puis un horizon massif et humide. La couleur reste pratiquement la même dans le profil et des nodules calcaires sont visibles depuis la surface, après un horizon de transition, on atteint la roche altérée dont la profondeur oscille entre 1,20 m et plus de 2 m".

Les vertisols topomorphes se situent surtout dans la région proche de Maroua et constituent naturellement les sols de la vaste plaine inondable des "yaérés" (SEGALEN, 1962). Ces sols dérivent de dépôts alluviaux plus ou moins anciens. Ils sont caractérisés par des teneurs faibles en matière organique et une teneur forte et régulière en argile de type smectique. De grosses fentes de retrait donnent en saison sèche une structure prismatique caractéristique. La saturation en calcium est forte et peut aller jusqu'à l'individualisation de carbonates.

Les vertisols ont donc des caractéristiques pédologiques particulières, qui sur l'ensemble du globe, et plus précisément au Nord-Cameroun, ont déterminé des modes d'exploitation très spécifiques.



	VERTISOLS LITHOMORPHES	VERTISOLS TOPOMORPHES
PAYSAGE PEDOLOGIQUE	combinaison ou mosaïque à faciès variés des pédiments aplanis, localement très ravinés, à végétation arbus-tive d'épineux souvent dégradée (Acacia ssp)	mosaïque des plaines argi-leuses (karal) sous savanes à épineux (Acacia ssp) relictuels
MATERIAUX ORIGINELS	roches volcaniques basiques, schiste andésitique, calco-schiste, amphibolite, meta-gabbion, gneiss à amphibole	argiles fluviatiles à fluvio-lacustres
UNITE PEDOLOGIQUE  CPCS	vertisols à pédoclimat sec localement associés à des sols fersiallitiques, phase érodée fréquente, faciès dégradé (planosolique, solonetzique), "hardé"(h)	vertisols hydromorphes neutres subalcalins carbonatés
FAO systems 1985	vertisol chromic	vertisol pellic
Soil Taxinomy/USDA	vertisol chromustert	vertisol pellustert

Tableau 2.4 : Différents types de vertisols au Nord Cameroun d'après BRABANT (1987).

### 2.2.1.2. Utilisation des vertisols.

Caractérisés par des capacités d'échanges cationiques élevées, les vertisols comptent parmi les sols chimiquement les plus riches des régions tropicales sèches. De plus, la forte capacité de rétention en eau leur permet de compenser les effets d'une pluviosité faible et erratique des zones semi-arides (SWINDALE, 1988). Cependant, les propriétés physiques sont une contrainte majeure à leur utilisation ; ce sont des sols très argileux et à drainage externe déficient, donc difficiles à travailler en saison pluvieuse.

Au vue de ces caractéristiques, l'exploitation traditionnelle de ces sols est caractérisée par une mise en culture dite de contre-saison, l'installation de la culture s'effectuant en fin de saison des pluies. Ces systèmes de culture se retrouvent en Inde, en Australie et en Afrique. Le sol est alors laissé en jachère au cours de la saison pluvieuse (SWINDALE, 1988 ; VIRMANI, 1988).

Dans la carte des contraintes et ressources en terre du Nord-Cameroun, BRABANT et GAVAUD (1985) regroupent une partie des vertisols dans une unité, désignée sous l'appellation "terres de karal" (unité 4). Ce sont, pour ces auteurs, des terres argileuses, généralement peu profondes, en terrain ondulé ou presque plat, calcaires et parfois sodiques en profondeur, sensibles à la dégradation.

"Karal" est un terme peuhl désignant communément les terres cultivées en sorgho repiqué, de contre-saison, le "muskwaari" (*Sorghum durum*).

D'après, SEIGNOBOS (*in press*), la pratique du sorgho repiqué de contre-saison est apparue dans la région au cours de la première partie du XIX<sup>ème</sup> siècle. Depuis est né l'art de la culture du "muskwaari", bâti sur une connaissance parfois pointue des sols et de leur potentialité agronomique. Dans une typologie de ces terres, SEIGNOBOS dénombre ainsi, dans le département du Diamaré, une douzaine de "karals" aux spécificités plus ou moins définies. Ces terres sont pour la plupart des vertisols ou des sols vertiques, d'autres types de sol sont également utilisés pour cette culture ; ce sont, par exemple, des sols fersiallitiques, occupant les piémonts des massifs de roches vertes, ou des sols hydromorphes de bords de mayo<sup>(1)</sup>. Nous reviendrons dans le chapitre suivant sur la description des itinéraires culturels traditionnels de cette culture.

---

(1) mayo = terme peuhl désignant les cours d'eau.

L'explosion des surfaces emblavées en "muskwaari" datent des années 1950. Elle s'est faite parallèlement à l'extension des cultures de coton et à la croissance démographique ; les contraintes liées à la disponibilité des sols et des temps de travaux pour les cultures de saison des pluies ont favorisé la pratique des cultures de contre-saison (ECKEBIL *et al.*, 1972 ; BOUTRAIS *et al.*, 1984). Au cours des trente dernières années, les terres de "karals" ont fait l'objet d'un "enjeu agronomique majeur". A l'heure actuelle, l'utilisation courante du "muskwaari" comme culture de rente, accentue la pression anthropique sur ce milieu, notamment aux abords des concentrations urbaines.

Cette exploitation intense serait, entre autre, à l'origine des phénomènes de dégradation des sols favorables à cette culture et donc plus particulièrement des vertisols. L'étendue des "terres de karal" au Nord-Cameroun est, selon BRABANT et GAVAUD (1985), de 550000 ha dont 135000 ha, soit 25 %, sont plus ou moins dégradés.

Avant de décrire la dégradation des vertisols au Nord-Cameroun, il apparaît important de rappeler les caractères spécifiques du fonctionnement hydrique de ces sols, dont le dysfonctionnement sera la principale conséquence de cette dégradation.

#### 2.2.1.3. Fonctionnement hydrique des vertisols.

Les fentes de retrait confèrent aux vertisols un régime hydrique particulier, influencé par une double dynamique hydrique interne : percolation rapide à travers la macroporosité fissurale, et diffusion lente dans les éléments structuraux à porosité fine (STIRK, 1954 ; BLAKE *et al.*, 1973 ; JAILLARD et CABIDOCHÉ, 1984). BOUMA *et al.* (1979) emploient le terme de "court-circuit" ("short circuiting") pour caractériser cette circulation préférentielle de l'eau à travers un système fissural. Ce fonctionnement conduit à une forte hétérogénéité des teneurs en eau dans un profil de vertisol, avec l'existence parfois de véritables "bulbes" d'humidité isolés (JAILLARD et CABIDOCHÉ, 1984). De même, ces auteurs démontrent l'importance du microrelief "gilgaï", qui canalise l'eau de ruissellement vers les dépressions au détriment des monticules. Cette concentration favorise l'infiltration à travers le réseau fissural. HOOGMOED et BOUMA (1980), considèrent également l'existence d'une valeur seuil de charge hydrique nécessaire à la percolation dans la macroporosité fissurale.

Tous ces auteurs ont noté les très faibles conductivités hydrauliques des matériaux constituant les éléments structuraux. Ceci explique notamment le drainage limité vers les horizons profonds, où l'absence d'alternances d'humectation-dessiccation ne permet pas les mouvements de retrait et de gonflement des argiles. HODNETT et BELL (1986) mesurent des pertes par drainage de l'ordre de 0 à 0,5 mm/jour à une profondeur de 2,5 m, et estiment que 90 % des variations de stock hydrique en phase de dessèchement sont dues à l'évapotranspiration.

En début de saison des pluies, le ruissellement de surface est très limité sur les vertisols après une phase de dessiccation, les fentes captant une bonne partie de cette eau. Cependant, après fermeture du réseau fissural, les coefficients de ruissellement augmentent ; ils sont conditionnés, non seulement, par le couvert végétal mais aussi par l'état d'humectation du sol au moment de la pluie (YULE, 1987 ; FREEBAIRN et WOCKNER 1986 ; THEBE, 1987 ; SWINDALE, 1988).

L'existence d'un réseau de macroporosité fissurale détermine donc le régime hydrique des vertisols. Il est alors évident que les conditions climatiques, caractérisées par la quantité, l'intensité et la fréquence des averses, auront un rôle essentiel sur le fonctionnement hydrique de ces sols. Par ailleurs, la diminution, voire la disparition, de cette macroporosité fissurale aura des conséquences sur leur régime hydrique. Les phénomènes de dégradation peuvent en être la cause essentielle.

### **2.2.2. Dégradation des vertisols.**

Avant de décrire l'état des connaissances sur les phénomènes de dégradation au Nord-Cameroun, nous nous proposons de passer en revue certaines observations réalisées en Inde, en Australie et en Afrique.

#### **2.2.2.1. Quelques exemples observés dans différents pays.**

De nombreux travaux se rapportent à des mesures d'érosion mécanique. En Inde, SWINDALE (1988) donne des pertes en terre de l'ordre de 30 à 60 t/ha/an sur des vertisols cultivés intensivement en station expérimentale ; 50 cm d'épaisseur de sol auraient été ainsi perdus en 1 siècle, sur des parcelles de 1 à 2 % de pente. Dans la province du Queensland en Australie, LOCH et DONOLLAN (1982) ont caractérisé les formes d'érosion sur vertisols ; ils considèrent que

l'érosion en nappe provoque les pertes les plus importantes. Selon FREEBAIRN et WOCKNER (1986), les concentrations en sédiments dans les eaux de ruissellement sont largement déterminées par le ruissellement de surface, lui-même fonction du couvert végétal et de l'intensité des pluies. L'impact des gouttes d'eau sur le sol provoque un fractionnement des agrégats et favorise la mise en suspension des particules fines. Cet effet est souvent accentué par des écoulements de surface de type turbulent lors des fortes averses. De même, VALENTIN (1981) signale la création d'un matériau boueux autour des agrégats dans le cas des sols riches en argiles gonflantes, soumis à une pluie intense. L'écoulement de cette boue survient quand l'humidité dépasse une certaine valeur appelée limite de liquidité. Ceci favorise donc les pertes en argiles mais aussi la formation, après dépôts, de croûtes de surface (VALENTIN, 1981). Sur vertisols cultivés, les effets de l'érosion sont d'autant plus importants qu'en général les cultures se situent en contre-saison et laissent donc le sol nu au début de la saison des pluies, période de forte agressivité des pluies (YULE, 1987 ; SWINDALE, 1988 ; VIRMANI, 1988).

Par ailleurs, MITCHELL (1987) a décrit, dans la vallée du Shire au Malawi, des processus de dégradation par perte de structure des horizons de surface. Les conséquences sont notamment une diminution de la disponibilité en eau pour les cultures. Il montre que ces phénomènes sont très liés à la mise en culture intensive et continue de coton ; les diminutions de rendement sont significatives 4 à 5 ans après le défrichage. Cette dégradation se caractérise par la diminution de la taille des agrégats, et provoque donc une sensibilité accrue à l'érosion. CHAN (1982) a mis en évidence, en Australie, des modifications de structure sur des sols irrigués et cultivés en coton de manière intensive. La porosité de l'horizon sous-cultural diminue, ce qui limite l'aération et par conséquent la croissance des racines. Cet effet s'ajoute à celui de l'engorgement hydrique auquel sont très sensibles ces sols. L'auteur note que ces modifications de structure s'accompagnent d'une perte des capacités de retrait et de gonflement au niveau de cet horizon.

#### **2.2.2.2. La dégradation des vertisols sur le bassin versant de Mouda au Nord-Cameroun.**

Situé à 30 km au sud de Maroua, le bassin versant de Mouda, d'une superficie de 18,1 km<sup>2</sup>, est représentatif des zones de plaines

de l'extrême nord du Cameroun, de par sa diversité écologique et édaphique.

Les études multidisciplinaires phyto-écologiques, hydrologiques et pédologiques ont abouti, entre autres, à la description détaillée d'une séquence de dégradation des vertisols, présentée par SEINY BOUKAR (1990) à qui nous avons emprunté les principales descriptions.

Mouda est situé au pied des collines à roches vertes. Sous les conditions climatiques de la région, et étant donnée la nature basique de la roche mère, la pédogénèse conduit à l'individualisation de sols fersiallitiques et de vertisols vers l'aval. Ces vertisols sont classés dans la sous-classe des vertisols lithomorphes. Selon GAVAUD (1971), les processus de dégradation consistent en une transformation de la structure prismatique des horizons supérieurs en une structure polyédrique fine, puis en structure massive. Simultanément, les taux en matière organique baissent, les éléments fins sont lessivés dans l'horizon superficiel, augmentant la susceptibilité à la battance. L'érosion hydrique prend alors le relais et conduit au décapage des horizons supérieurs jusqu'à l'affleurement des horizons profonds à nodules calcaires. La figure 2.6 représente la répartition sur la toposéquence des différents faciès de dégradation, et des systèmes écologiques correspondants sur le bassin versant de Mouda.

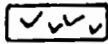




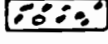
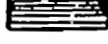
#### 2.2.2.2.1. Morphologie des différents stades de dégradation.

Quatre stades, aux formes de dégradation de plus en plus accentuées, ont été décrits à Mouda : le vertisol modal (VM), le vertisol dégradé (VD), les sols "hardés" (HV) et un faciès régosolique (HN).

##### Les vertisols modaux.

Ils correspondent aux vertisols typiques ; la teinte est gris foncé à noir, la teneur en argile est constante dans tout le profil (40 à 45 %) de type smectite essentiellement. On observe de larges fentes de retrait (2 à 3 cm) disposées en réseau polygonal atteignant, pendant la période sèche, un mètre de profondeur, un relief de type "gilgai", et un gonflement en saison pluvieuse. La CEC est de l'ordre de 35 meq/100g de terre soit 70 meq/100g d'argile. Le calcium est

LEGENDE

-  ROCHE VERTE VULCANO SEDIMENTAIRE DE MAROUA
-  GNEISS ET FILONS DE QUARTZ
-  MATERIAUX SABLO-ARGILO
-  MATERIAUX ARGILO-LIMONEUX A LIMON-ARGILEUX
-  MATERIAUX ARGILEUX
-  COLLUVIONS SABLO-ARGILEUSES + PIERRES ET CAILLOUX
-  ALLUVIONS

OUEST

EST

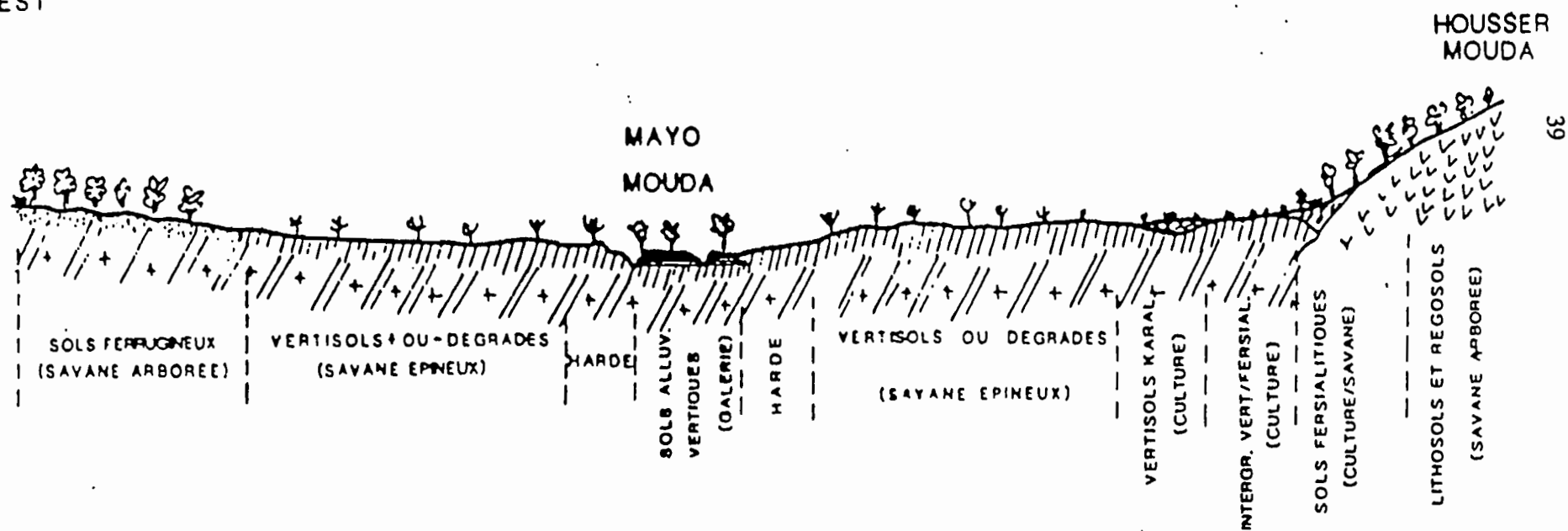


Figure 2.6 : Répartition schématique des systèmes écologiques de Mouda (coupe) (d'après PONTANIER *et al.*, 1984).

l'élément dominant du complexe absorbant et représente 60 à 80 % des cations totaux.

#### **Les vertisols dégradés.**

Les signes de dégradation sont perceptibles dès la surface : faible expression des caractères vertisoliques, microrelief plat, rares fentes de retrait, battance développée. Les cinq premiers centimètres sont appauvris en argile (11,5 %). Ceci entraîne une diminution de la CEC (20 à 25 meq/100g de terre), une acidification (pH = 5,5). L'hétérogénéité spatiale est une des caractéristiques de ces sols, avec des taches de dégradation à des stades plus ou moins avancés.

#### **Les sols "hardés".**

Ces sols se caractérisent par une structure massive, sans pores ni activité biologique sur les vingt premiers centimètres et parfois plus, à faible teneur en argile (10-15 %). Quelques fentes verticales et discrètes semblent délimiter parfois dans cet horizon superficiel des unités structurales. Le contact entre cet horizon appauvri, et celui plus argileux, est parfois net et rectiligne, d'où le caractère planique attribué par certains auteurs. Les nodules calcaires, toujours présents dans les sols cités jusqu'ici, apparaissent là à plus faible profondeur (40-50 cm), en raison d'une certaine troncature. A partir de 20 cm, les caractères vertiques sont toujours reconnaissables.

#### **Le faciès régosolique.**

Le faciès régosolique correspond au stade ultime de la dégradation des vertisols : l'érosion a tronqué le sol jusqu'à l'horizon à nodules calcaires (GAVAUD, 1971). Ces sols se rencontrent généralement le long des axes de drainage (bras des rivières), et forment des paysages à régosols ou de "bad-lands" présentant des ravines et des griffes d'érosion parfois spectaculaire (BRABANT et GAVAUD, 1985). La structure de l'horizon de surface est polyédrique moyenne et fine, le sol est recouvert d'une pellicule de battance argileuse. La texture de la matrice est essentiellement argileuse (40-45 % d'argile), le pH eau est élevé dès la surface (8,8) et atteint 9,5 au delà de 80 cm.



### 2.2.2.2.2. Ruissellement, efficacité des pluies et pertes en terre sur les différents faciès de dégradation des vertisols.

Les caractéristiques hydrodynamiques de ces sols ont été étudiées, sur le bassin versant de Mouda, par THEBE (1987), PONTANIER et THEBE (1989) et SEINY BOUKAR (1990).

Les comportements hydrodynamiques des sols de la séquence de dégradation ont été abordés par deux méthodes :

- une de type synchrone grâce à la simulation des pluies
- une de type diachrone, sous pluies naturelles.

Dans cette démarche, la simulation des pluies a permis de mener une analyse fine des paramètres qui influencent l'infiltration, ainsi que le ruissellement à la surface des sols.

Les mesures sous pluies naturelles permettent l'intégration des facteurs qui ne peuvent être reproduits à l'échelle de la simulation des pluies, comme le couvert végétal et l'activité mésofaunique.

Les résultats sous pluies simulées concernent :

- la pluie d'imbibition ( $P_i$ ) qui caractérise la capacité d'absorption de l'eau de pluie par un sol desséché ( $P_{is}$ ) ou un sol humide ( $P_{ih}$ ) ;
- le coefficient d'efficacité ou coefficient d'infiltration, c'est à dire le rapport de la lame infiltrée sur la pluie ( $K_e$ ) ;
- l'intensité maximale d'infiltration stabilisée. Cette variable indique l'aptitude minimale d'un sol à l'infiltration au cours d'une averse qui survient quand le sol est humide (II).

La valeur de la pluie d'imbibition sur sol sec varie de 18 mm pour le vertisol modal à 3,6 mm pour les sols "hardés". Sur le vertisol modal, la première pluie permet la fermeture des fentes de retrait par gonflement des argiles. Par contre sur les sols "hardés", l'absence de structure en surface et la pellicule de battance généralisée sont responsables de la faible infiltration de l'eau. La réaction des vertisols dégradés est intermédiaire  $P_{is} = 9,6$  mm.

Globalement, au terme d'une campagne de simulation des pluies, réalisée en 3 averses et atteignant 111,7 mm, avec une intensité maximale de 72,5 mm/h, le comportement des différentes unités de cette séquence vertisolique a été précisé : le coefficient global d'efficacité des précipitations, dans la recharge des réserves hydriques des sols, varie de 82 % pour l'unité modale, à 27 % environ pour les sols "hardés" et 39 % pour le faciès régosolique. Les intensités limites d'infiltration sont relativement faibles, les différentes valeurs correspondent à la même gradation avec 25 à 30 mm/h pour le faciès modal, 15 à 20 mm/h pour le faciès dégradé et 10 à 15 mm/h pour les sols "hardés".

Les mesures sous pluie naturelle ont permis de distinguer 3 périodes d'influence du couvert végétal (CV) et de l'indice d'antériorité des pluies (IK). Ces

périodes se situent avant, pendant et après le mois d'août, mois qui correspond au paroxysme de la saison des pluies et à un développement maximal de la végétation.

L'influence du couvert des herbacées sur le ruissellement est peu significatif, THEBE (1987) estime le seuil d'influence à 30 % de couvert végétal. Ce seuil est atteint en général en fin de saison des pluies et sa prise en compte est donc peu significative.

Des modèles de lame ruisselée ont été établis pour ces différentes périodes et les différents types de faciès.

La modification des propriétés physico-chimiques des vertisols a pour conséquence principale l'augmentation du ruissellement de surface et la baisse de l'efficacité des pluies. Dans le même temps, on assiste à l'accroissement de la sensibilité des sols à l'érosion et à la diminution des réserves disponibles pour les végétaux.

SEINY BOUKAR (1990) donne des mesures globales de détachabilité(1) sous pluie simulée : les valeurs vont de 108 g/m<sup>2</sup> de terre perdue pour les vertisols modaux, jusqu'à 637 g/m<sup>2</sup> sur les vertisols dégradés et les hardés, soit une érosivité moyenne par millimètre d'eau ruisselée de 5,5 g/mm/m<sup>2</sup> pour le vertisol modal, à 8,7 g/mm/m<sup>2</sup> pour le vertisol dégradé.

THEBE (1987) note, sous pluie naturelle, des valeurs d'érosivité nettement supérieures. Se référant à VALENTIN (1981), il explique ce phénomène par l'importance, sur sols argileux, des alternances humectation-dessiccation dans le détachement des éléments fins. De même, il insiste sur le rôle de la végétation sur l'érosion. L'effet protecteur de la végétation est net sur les parcelles de 1 m<sup>2</sup>, où les quantités de terre détachée sont, pour des couverts de 50 à 60 %, de l'ordre du quart des valeurs obtenues sur la parcelle nue. Un autre effet important est celui du travail du sol, qui tout en limitant le ruissellement augmente la sensibilité des sols à l'érosion. Ainsi THEBE (1987) remarque l'extrême fragilisation des vertisols cultivés : sur une placette labourée, bien que le coefficient de ruissellement diminue de 60 % par rapport à une placette non labourée, l'érosion est de 40 % supérieure(2).

Parallèlement aux études conduites sur parcelles de 1 m<sup>2</sup>, PONTANIER et THEBE (1989) ont suivi les caractéristiques hydrologiques à l'échelle du champ à travers des mesures sur bassin versant de 3000 m<sup>2</sup> représentatif des systèmes écologiques à vertisols dégradés. Les principales conclusions concernant l'érosion sont :

- la violence des phénomènes érosifs engendrés par les événements pluvieux les plus intenses (en 1985, les 5 plus fortes averses ont provoqué 50 % de l'érosion annuelle).

---

(1) La détachabilité est l'aptitude d'un sol à être fractionné en particules susceptibles d'être transportées (VALENTIN, 1981). Elle est quantifiée par des valeurs de pertes en terre en g/m<sup>2</sup>.

(2) Ces travaux sur parcelle de 1 m<sup>2</sup> donne une appréciation relative de la sensibilité à l'érosion des différents types de sols. Ils ne renseignent pas sur les valeurs absolues de perte en terre ; la méthode n'intègre pas en effet la composante ruissellement de l'érosion hydrique (VALENTIN, 1981).

- de fortes valeurs d'érosion de 10 à 20 t/ha/an en fonction de l'agressivité des pluies de la saison ;

Il faut d'ailleurs noter que, d'une façon générale, les pertes en terre subies par la plupart des sols tropicaux se produisent au cours de 4 à 5 averses érosives. Il en va ainsi pour les sols ferrallitiques de Madagascar comme l'ont montré les résultats, obtenus en bassins versants, par les chercheurs du CTFT (BOURGEAT, 1972).

Ces résultats confirment les observations de BRABANT et GAVAUD (1985) relatives aux formes d'érosion spectaculaires observées sur vertisols dans la région de Kaélé.

#### 2.2.2.2.3. Dégradation et réserves en eau disponibles.

SEINY BOUKAR (1990) a étudié les modifications du régime hydrique des vertisols de Mouda, correspondant aux différents faciès de dégradation.

Le régime hydrique des vertisols est fortement influencé par la présence ou l'absence de fentes de retrait. La fermeture des horizons supérieurs suite à la dégradation est déterminante pour le stockage de l'eau dans ces sols et, par conséquent, pour les disponibilités hydriques utilisables par les végétaux.

Dans le faciès modal, la structure polyédrique de surface et les fentes de retrait permettent une bonne reconstitution de la réserve en eau disponible du sol dans les horizons supérieurs, tout en conservant des réserves importantes dans les couches profondes. Dans les faciès dégradés, la raréfaction des fentes et le développement de la pellicule de battance ne permettent pas une bonne recharge des réserves en eau en profondeur et en surface, la période de déficit hydrique des couches superficielles est donc plus longue. Sur les sols "hardés", la structure et la porosité totalement fermées empêchent quasiment toute reconstitution des réserves hydriques sur l'ensemble du profil. Le tableau 2.5 résume les données observées sur les réserves disponibles pour la séquence de dégradation à Mouda en 1986 (SEINY BOUKAR, 1990).

#### 2.2.2.2.4. Végétation naturelle de la séquence de dégradation.

D'une façon générale, la dégradation des sols provoque selon LETOUZEY (1985) :

- une diminution des éléments soudaniens dans les formations dégradées, comme par exemple *Anogeissus leiocarpus*, *Tamarindus indica*, *Boswellia dalzielli*,... ;

	Réserve utile Ru mm 0-80 cm	Profondeur maximale humectée cm	Réserve d'eau disponible à la végétation maximale Rd mm		Durée annuelle moyenne de la sécheresse édaphique absolue mois	
			0 - 40 cm	0 - 80 cm	0 - 40 cm	0 - 80 cm
Vertisol modal VM	170/190	60/70	61,6	68,2	5	0
Vertisol dégradé VD	150/170	50/60	37,0	42,0	9	8
Hardé HV	130/150	40/50	3,9	3,9	10	10

\*la sécheresse édaphique se définit par une réserve disponible nulle pendant au moins 10 jours au cours du mois.

Tableau 2.5 : Appréciation globale du régime hydrique des sols de la séquence de dégradation des vertisols à Mouda, d'après SEINY BOUKAR (1990).

- une augmentation parallèle liée à l'aridité édaphique croissante des éléments sahéliens, comme *Acacia senegal*, *Bauhinia rufescens*, *Boscia senegalensis*, *Maruea crassifolia*,... ;
- une diminution de la diversité floristique ;
- une augmentation des arbustes épineux ;
- une diminution du nombre de graminées pérennes ;
- une augmentation des espèces à cycles courts ;
- une diminution de la biomasse et de la production végétale.

D'après SEGHIÉRI (1990), la richesse floristique des écosystèmes diminue avec l'aridité édaphique, mais celle-ci n'entraîne pas de modification radicale de la composition floristique entre vertisol modal et sol "hardés", qui représentent les deux extrêmes du gradient hydrique entre les différents faciès de dégradation. Cependant DONFACK (*non publié*) remarque que le stade intermédiaire vertisol dégradé présente une richesse floristique plus importante que les milieux extrêmes. Ce phénomène peut être expliqué par une juxtaposition, sur ce milieu, de zones aux propriétés physico-hydriques différentes, qui induit la présence d'espèces caractéristiques des stades de dégradation, et augmente ainsi la richesse floristique de ce milieu.

Au Nord-Cameroun, la végétation des vertisols modaux est caractérisée par l'absence d'une strate arborée nette. Elle est dominée par des ligneux bas tels que : *Acacia seyal*, *Acacia hockii*, *Piliostigma reticulata* et des *Combretum* divers. A ces espèces s'ajoute par endroits *Anogeissus leiocarpus*. La strate herbacée est dominée par *Andropogon gayanus* et *Loudetia togoensis*. Le recouvrement ligneux est voisin de 25 %, alors qu'en période de végétation, celui des herbacées est de 100 %.

La physionomie de la végétation des vertisols dégradés est celle d'une savane arbustive à épineux. On note cependant la présence de ligneux hauts, trop dispersés pour apparaître nettement comme formant une strate ; ce sont *Anogeissus leiocarpus*, *Sterculia setigera*, *Sclerocarya birrea* et *Boswellia dalzielli*. La strate basse des ligneux est dominée par : *Acacia hockii*, *Ziziphus mauritiana*, *Dichrostachys glomerata*, *Feretia apodanthera* et *Piliostigma reticulatum*. *Loudetia togoensis* et *Chloris lamproparia* dominent la strate herbacée. Le recouvrement des ligneux est variable ; de l'ordre de 5 % pour les stades les plus dégradés. Il en est de même pour le recouvrement des

herbacées qui peut atteindre 100 % par endroit et être pratiquement nul en d'autres lieux.

La végétation des sols "hardés" a la physionomie d'une savane arbustive très claire. Les ligneux sont dominés par *Dichrostachys glomerata*, *Combretum sp.* et quelquefois *Lannea humilis*. S'ajoutent à ces espèces *Balanites aegyptiaca*, *Capparis sp.*, *Cissus quadrangularis* et plusieurs *Acacia sp.*, dont le plus commun est *Acacia gerrardii*. La strate herbacée est dominée par *Schoenefeldia gracilis*, *Michrochloa indica* et *Aristida hordeacea*. En début de saison des pluies, une Liliacée *Dimiopsis cf. barteri*, plante à bulbe, domine toute la strate herbacée.

### 2.2.2.3 Conclusion sur la dégradation des vertisols.

La dégradation des vertisols est donc un phénomène important, signalée par de nombreux auteurs au Nord-Cameroun ainsi que dans d'autres pays de la zone semi-aride.

Les principales conséquences sont une augmentation du ruissellement, et donc une baisse de l'efficacité des pluies avec diminution concomitante des disponibilités en eau pour les végétaux. L'érosion, très liée au ruissellement, peut prendre alors des allures catastrophiques.

Il convient donc de tenter de réhabiliter ces sols en vue d'une meilleure production agro-pastorale.

**CHAPITRE III.**

**METHODES EXPERIMENTALES**  
**ET**  
**PROTOCOLE D'ETUDE.**

Nous aborderons l'amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés à partir de l'expérimentation, en milieu contrôlé, de différents aménagements réalisés à la surface du sol. Le but est de maîtriser le ruissellement et d'augmenter l'efficacité des pluies. Les traitements ont été choisis suivant le type de sol, l'état de la dégradation et les objectifs de la réhabilitation.

Les indicateurs suivis sur les différentes parcelles sont : l'humidité volumique et les réserves hydriques disponibles pour la végétation, le comportement de deux types de culture de sorgho sur les vertisols dégradés, et de la végétation naturelle sur les sols "hardés".

Nous décrivons dans un premier temps les aménagements testés par type de sol, et ensuite, les différents indicateurs suivis.

### **3.1. LES AMENAGEMENTS TESTES ET LE PLAN EXPERIMENTAL.**

Après avoir précisé les sites et les sols retenus, les aménagements testés et la mise en place du protocole expérimental seront présentés.

#### **3.1.1. Localisation des sites.**

Les parcelles d'expérimentation ont été installées au sein de la station de recherche du Centre de Recherche Agronomique de Maroua, située sur le bassin versant du mayo Mouda.

Les sites choisis sont caractéristiques des sols "hardés" et des vertisols dégradés de la séquence de dégradation des vertisols décrits au chapitre II.



### 3.1.1.1. Les sols "hardés".

En fin de saison sèche, l'aspect de surface des sols "hardés" est une juxtaposition de tâches claires et sombres. Les tâches sombres correspondent aux zones de développement de la végétation lors de la saison des pluies précédentes ; on y note la présence d'une graminée pérenne *Sporobolus festivus*. Les ligneux présents sont entre autres *Lannea humilis* et *Dychrostachys glomerata*.

Le profil pédologique est caractérisé par un horizon superficiel sablo-argileux massif et compact, recouvert d'une épaisse pellicule de battance. Cet horizon, épais de 5 à 20 cm, recouvre un horizon sous-jacent argileux et vertique présentant des nodules calcaires. Le tableau 3.1 présente les caractéristiques physico-chimiques des sols "hardés". Par commodité pour la suite de l'exposé, nous désignerons ces sols par le terme "hardé". Nous rappellerons que ce terme, qui peut représenter différents types de sols au Nord-Cameroun, implique, dans notre cas, une appartenance à la famille des vertisols.

### 3.1.1.2. Les vertisols dégradés.

Une des caractéristiques de la morphologie des vertisols dégradés est la faible expression des caractères vertisoliques de surface ; on observe donc la présence d'un micro-relief plat, la diminution du nombre de fentes de retrait et la présence de phénomènes de battance. Sous un horizon superficiel (0 à 30 cm) de texture sablo-argileuse, auquel s'ajoutent quelques fentes de retrait, on trouve un matériau argileux vertique, avec apparition progressive des nodules calcaires. Les caractéristiques physico-chimiques sont exposés dans le tableau 3.2.

## 3.1.2. Les aménagements testés.

Les aménagements testés ont pour rôle principal de capter le ruissellement, et de favoriser l'augmentation des quantités d'eau infiltrées et stockées dans le sol. Notons que ces aménagements sont permanents sur plusieurs saisons, contrairement à certaines façons culturales, tel le buttage, qui sont appliquées en fonction du cycle cultural et renouvelées chaque année.

Les principes retenus pour atteindre les objectifs fixés sont :

- *l'arrêt ou le ralentissement du ruissellement*, obtenus par la mise en place d'une barrière de type diguette, et par rupture

horizon cm	bases échangeables meq/100g					densité apparente sèche g/cc	pF g/g	
	T	Ca	Mg	K	Na		2,5	4,2
0-5	23,4	10,4	3,76	0,32	0,25	1,730	16,7	8,5
5-35	35,7	23,4	5,34	0,29	0,80	1,730	23,2	15,3
35-70	30,2	25,0	6,68	0,35	0,51	1,870	30,8	17,3
>70	30,6	30,6	2,28	0,51	0,95	1,870	40,1	21,2

Tableau 3.1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols du site expérimental sur sols "hardés" à Mouda.

horizon cm	bases échangeables meq/100g					densité apparente sèche g/cc	pF g/g	
	T	Ca	Mg	K	Na		2,5	4,2
0-15	27,0	15,0	5,62	0,36	0,96	1,540	24,3	14,7
15-40	30,1	16,4	5,34	0,32	0,79	1,540	28,6	17,4
40-10	35,2	18,4	5,58	0,41	0,86	1,830	30,2	18,5
>100	35,8	21,4	6,18	0,45	0,83	1,830	34,0	19,6

Tableau 3.2 : Caractéristiques physico-chimiques des sols du site expérimental sur "vertisols dégradés" à Mouda.

de la croûte de battance, avec augmentation de la rugosité à la surface du sol ;

- *l'augmentation des quantités d'eau "infiltrables"* par "supplémentation" en eau d'une zone, grâce aux ruissellements provenant d'une partie amont ;

Basés sur ces principes, quatre aménagements, couplés avec des façons culturales, sont testés : le pitting, les bandes alternées, le microcatchment, et les casiers. La figure 3.1 représente schématiquement ces aménagements.

#### **Le pitting ou trouaison.**

Le ruissellement est capté dans des trous confectionnés à la surface du sol. D'une profondeur de 0,15 m, de 1 m de longueur et de 0,30 m de largeur, ces mini-fosses sont disposées, perpendiculairement à la pente, en quinconce sur des lignes séparées de 1 m. La terre excavée est placée en tas sur le bord aval du trou.

#### **Les bandes alternées et le microcatchment.**

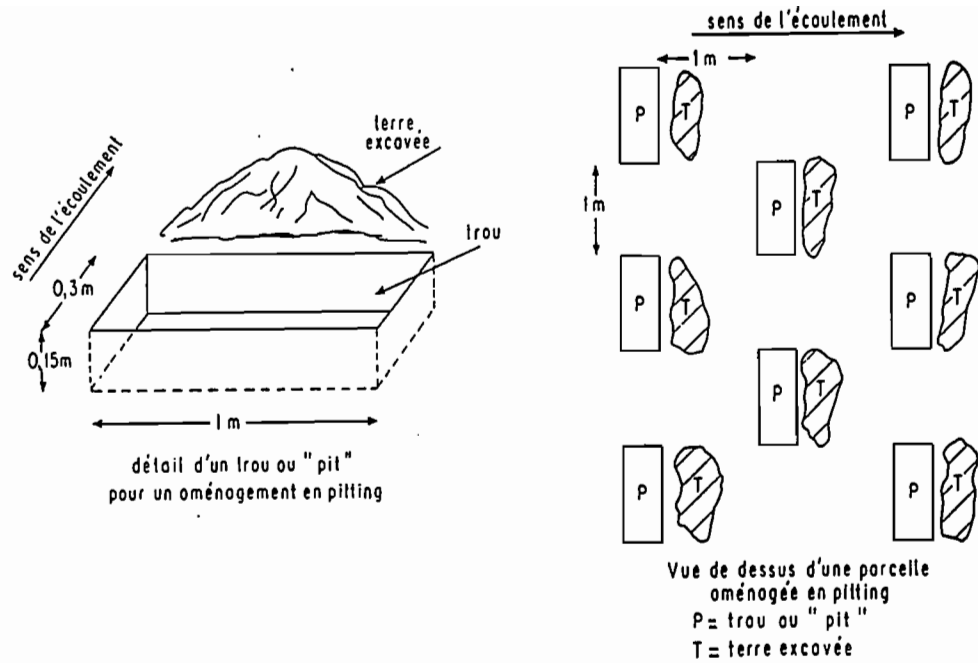
Ces aménagements sont basés sur l'alternance d'une bande labourée, où l'on détruit la croûte de battance par un travail du sol, et d'une bande non labourée située en amont de la précédente ; celle-ci joue le rôle d'impluvium. La différence entre les traitements bandes alternées et microcatchment consiste en l'édification pour ce dernier d'une diguette sur le front aval de la bande labourée, afin d'éviter un ruissellement éventuel au delà de cette bande.

#### **Les casiers.**

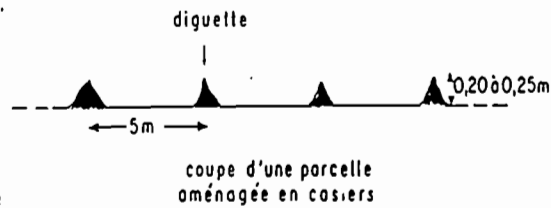
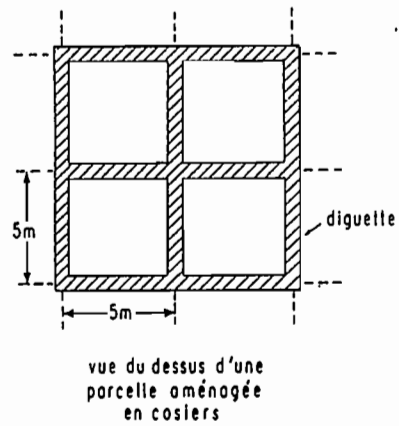
L'aménagement en casiers consiste en un carroyage de la surface du sol par des diguettes de 20 à 30 cm de hauteur. Les dimensions de chaque casier sont de 5 m × 5 m. On considère dans ce cas que le ruissellement est pratiquement inexistant, sauf s'il y a débordement.

### **3.1.3. Les parcelles expérimentales et les techniques culturales appliquées.**

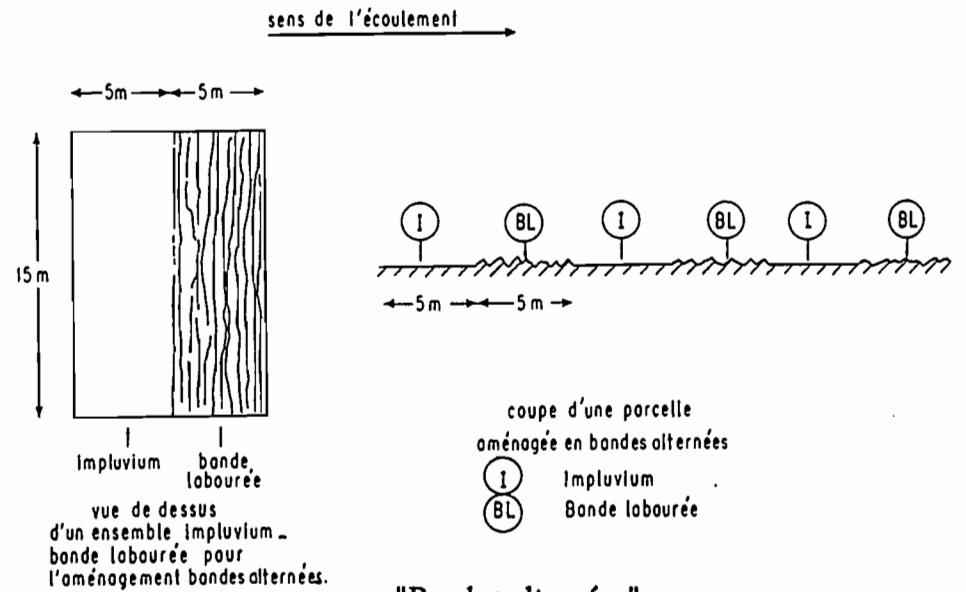
Il est rappelé ici que seuls sont mis en culture les vertisols dégradés. Les sols "hardés" font l'objet d'une tentative d'amélioration du régime hydrique, en vue d'une réactivation biologique du sol.



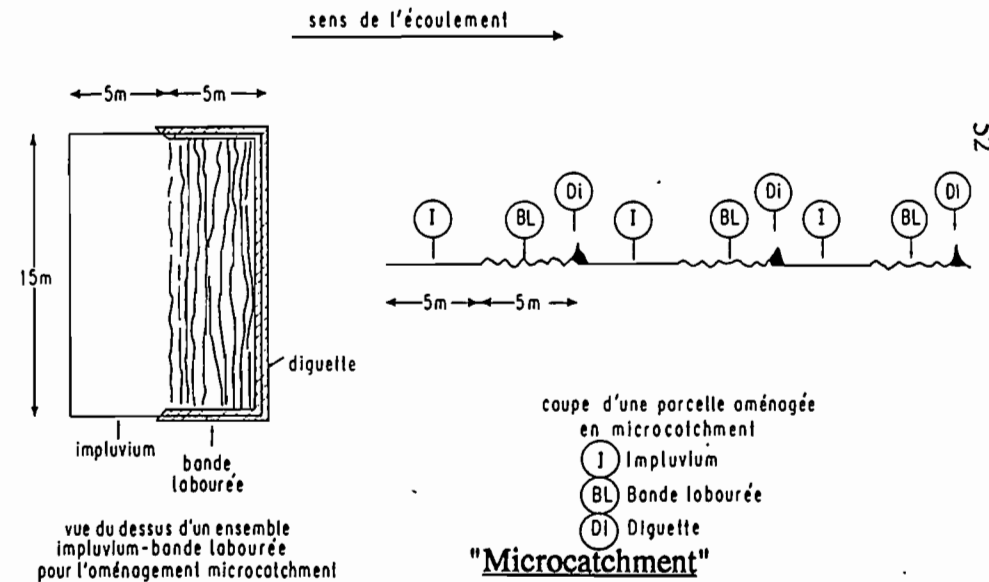
**"Pitting"**



**"Casiers"**



**"Bandes alternées"**



**"Microcatchment"**

Figure 3.1.: Schéma descriptif des aménagements "pitting", "microcatchment", "bandes alternées" et "casiers".

### **3.1.3.1. Les parcelles expérimentales sur les sols "hardés".**

Les aménagements testés sur les sols "hardés" sont le pitting, les bandes alternées et le microcatchment ; tous sont comparés à une parcelle témoin sans aménagement particulier.

En dehors de l'aspect de la conservation des eaux et du sol, l'objectif sur les sols "hardés" est également d'améliorer le statut organique du sol. Des labours successifs sont donc réalisés, permettant l'enfouissement de la végétation spontanée. Seuls les traitements bandes alternées et microcatchment sont concernés par ces façons culturales.

Les parcelles élémentaires sur lesquelles sont appliquées les traitements mesurent 15 m de large et 30 m de long. Pour les traitements microcatchment et bandes alternées, la parcelle élémentaire comprend donc trois ensembles impluvium - bande labourée. L'ensemble est répété une fois. Nous avons donc deux blocs de 4 parcelles de 450 m<sup>2</sup> chacune.

L'expérimentation a été mise en place en mai et juin 1989. Les trous ont été réalisés à l'aide de pioches et de houes.

Trois labours en 1989 et un en 1990, réalisés par culture attelée, ont permis de casser la croûte de battance, de travailler le sol de 0 à 10 cm de profondeur, et d'enfouir partiellement la végétation naturelle. Les résultats de ces opérations culturales sur les "hardés" sont apparus relativement inégaux. Les causes sont une hétérogénéité du sol en surface, une difficulté à enfouir une biomasse herbacée parfois importante, une maîtrise limitée de la technique de labour attelé et une déficience de la force de traction animale en début de saison sèche (IRA-CNS, 1989).

### **3.1.3.2. La mise en culture des vertisols dégradés.**

L'objectif est de régulariser l'utilisation des vertisols dégradés et d'augmenter les rendements en limitant les risques de déficit dans l'alimentation hydrique des plantes cultivées.

Nous avons donc testé différents aménagements et façons culturales, ayant pour but une meilleure maîtrise des eaux de pluies et une plus forte efficacité dans la recharge hydrique des sols, qui permet d'assurer l'adéquation des périodes de réserves hydriques disponibles dans le sol et les périodes de besoins en eau des cultures.

Les besoins en eaux des plantes varient suivant l'espèce cultivée et son cycle cultural, nous avons envisagé deux alternatives dans

l'utilisation des vertisols, la culture de saison des pluies (sorgho de variété "djigaari") et la culture de contre-saison (sorgho de variété "muskwaari").

### **3.1.3.2.1. Parcelles expérimentales avec mise en culture de saison des pluies sur vertisols dégradés.**

Trois itinéraires cultureux sont comparés dans le cas de la culture d'un sorgho en saison des pluies :

- l'itinéraire traditionnel basé sur un semis direct sans préparation spéciale du lit de semence, avec 2 à 3 sarclages à la houe en cours de cycle ;
- un itinéraire avec un labour en début de saison des pluies, dès qu'une première pluie suffisante permet le travail d'une charrue tractée par 2 boeufs ; les façons culturales sont ensuite identiques à l'itinéraire traditionnel ;
- un itinéraire identique au précédent, mais avec un buttage des plantes par une charrue bisocs, 30 à 40 jours après le semis.

Chaque itinéraire cultural est mis en place sur une parcelle de 15 m × 30 m, dont la longueur a pour direction la pente principale du terrain. Nous avons réalisé une répétition, l'expérimentation comporte donc deux blocs de trois parcelles.

### **3.1.3.2.2. Parcelles expérimentales avec mise en culture de contre-saison sur vertisols dégradés.**

L'objectif est ici d'obtenir le maximum de réserve hydrique en fin de saison des pluies, période qui correspond à la phase d'installation de la culture.

Deux aménagements, les casiers et le microcatchment, sont comparés à l'itinéraire traditionnel pour lequel aucun ouvrage de collecte et de conservation des eaux n'est réalisé.

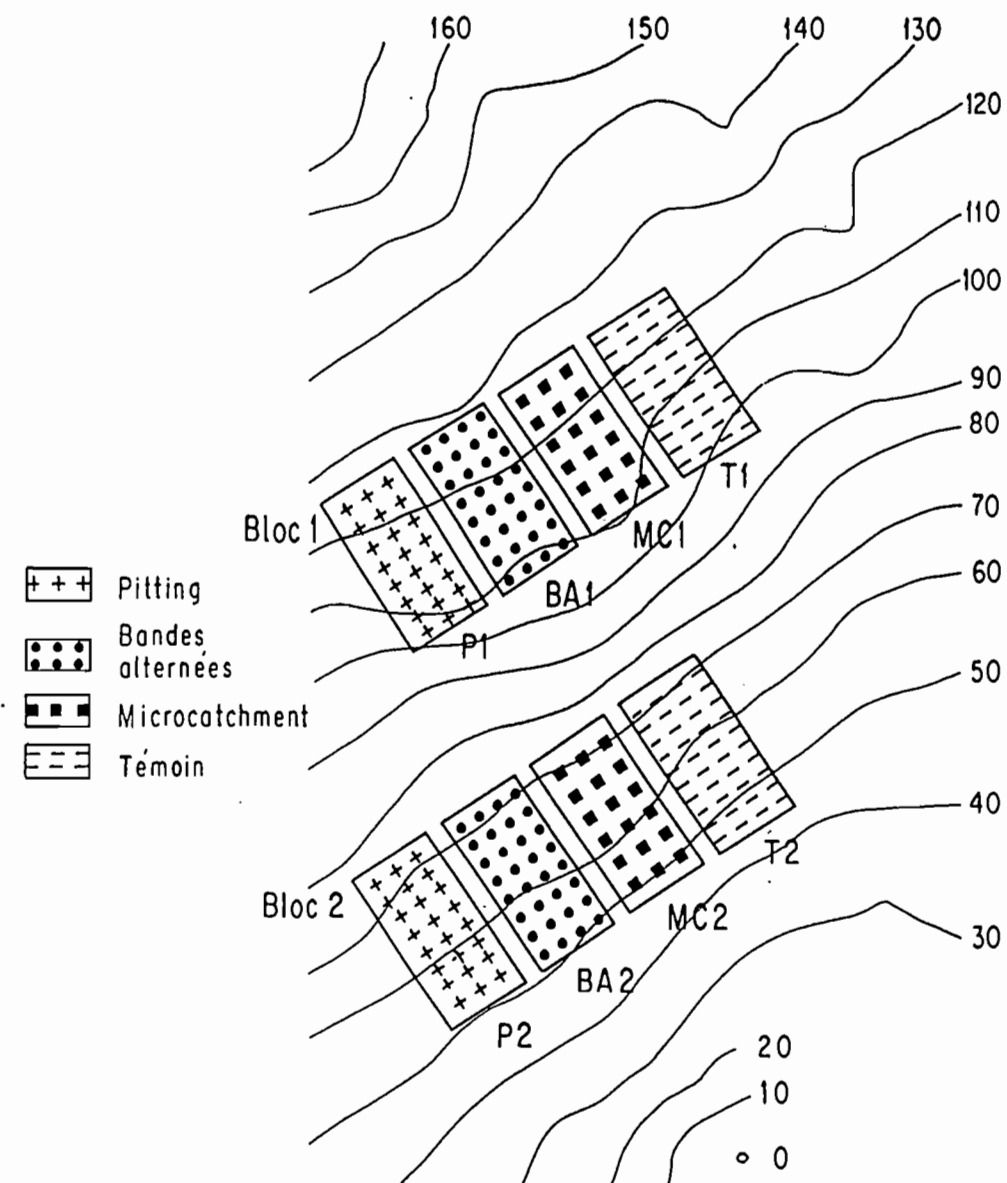
Le plan expérimental est le même que pour les cultures de saison des pluies, soit deux blocs de trois parcelles. La mise en place des aménagements a été réalisée en mai 1989.

Les aménagements et façons culturales testés sont résumés dans le tableau 3.3. La figure 3.2 présente le plan d'expérience sur les sols "hardés" et les vertisols dégradés.

Les parcelles expérimentales décrites, nous pouvons aborder les différents indicateurs suivis.

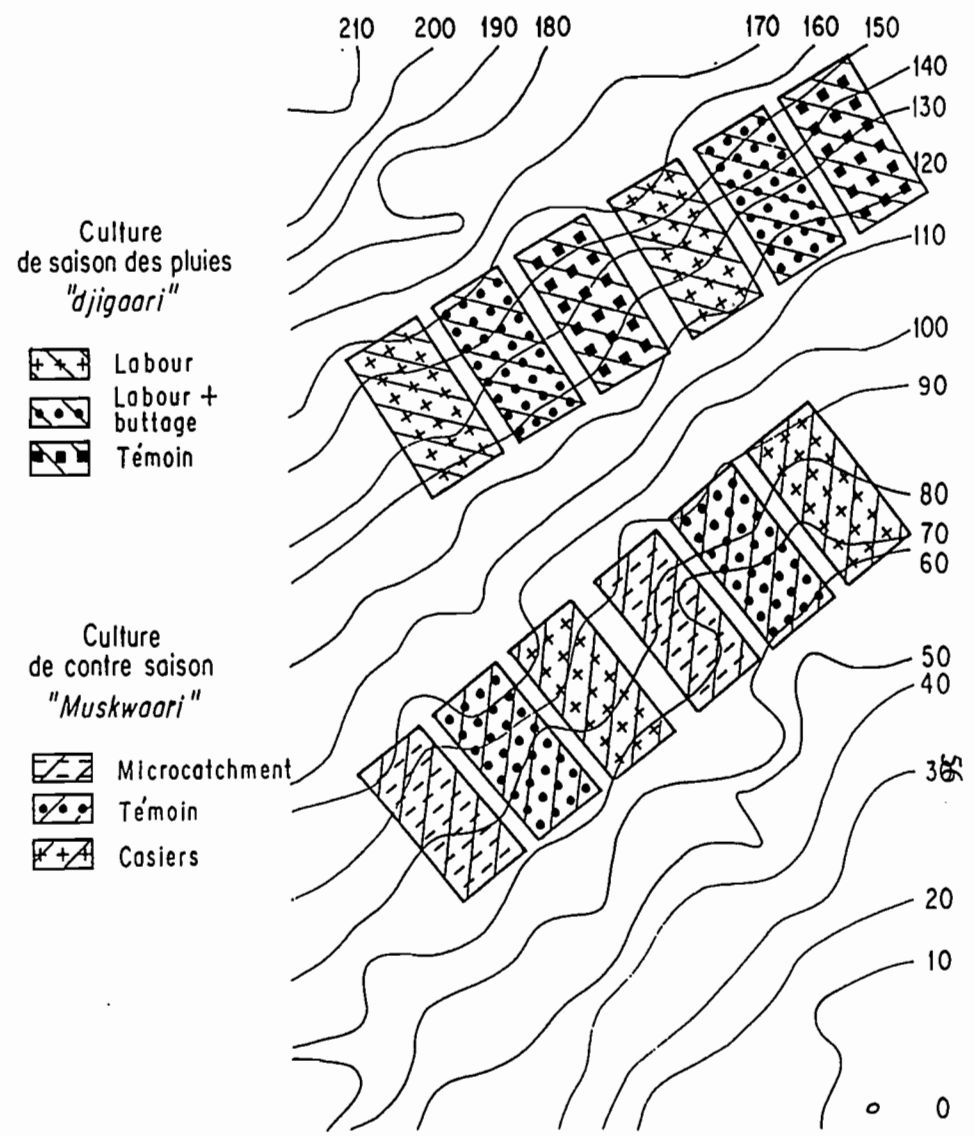
SOLS	DESIGNATION	AMENAGEMENTS				FACONS CULTURALES PARTICULIERES		MISE EN CULTURE	
	PARCELLE	Pitting	Bande alternee	Micro-catchment	Casier	Labour	Buttage	Saison des pluies	Contre saison
VERTIGORLADÉ	L	0	0	0	0	+	0	+	0
	B	0	0	0	0	+	+	+	0
	T	0	0	0	0	0	0	+	0
	C	0	0	0	+	0	0	0	+
	MC	0	0	+	0	+	0	0	+
	TM	0	0	0	0	0	0	0	+
SOHLARDE	P	+	0	0	0	0	0	0	0
	BA	0	+	0	0	+	0	0	0
	MC	0	0	+	0	+	0	0	0
	T	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.3 : Schéma récapitulatif des différents aménagements et façons culturales testées sur l'expérimentation de Mouda (1989-1991). Le signe + indique l'aménagement ou la façon culturale appliquées à la parcelle désignée par une lettre majuscule.



Dimensions des parcelles  
30 m X 15 m

Expérimentation sur sols "hardés"



Dimensions des parcelles  
30 m X 15 m

Expérimentation sur vertisols dégradés

Figure 3.2 : Plan d'expérience et situation des parcelles expérimentales sur la réhabilitation des terres marginales.



## 3.2. INDICATEURS SUIVIS.

Les indicateurs suivis sont de deux natures. D'une part, des mesures d'humidité volumique ont permis de suivre l'effet des aménagements sur les réserves hydriques du sol. D'autre part, nous avons observé le comportement des cultures sur les vertisols dégradés et de la végétation naturelle sur les sols "hardés".

### 3.2.1. Humidité volumique et réserve hydrique des sols.

Avant d'aborder la méthode et le plan de mesure, nous allons rappeler quelques définitions et évoquer les problèmes de mesure inhérents aux propriétés spécifiques des vertisols.

#### 3.2.1.1. Humidité pondérale, humidité volumique, stock en eau des sols.

L'humidité pondérale ou teneur en eau gravimétrique ( $H_g$ ) est la masse d'eau relative à la masse des particules du sol sec. Le sol sec est défini par le sol séché à l'équilibre dans une étuve à 105°C.

L'humidité volumique ou teneur en eau volumique ( $H_v$ ) est le volume d'eau relatif au volume total du sol.

L'humidité volumique et l'humidité pondérale sont reliées par la densité apparente sèche ( $\Delta_a$ ), rapport entre la masse de particules sèches et le volume total du sol, y compris les particules et les pores.

$$H_v = \Delta_a \times H_g$$

L'utilisation de l'humidité volumique est la plus intéressante, car elle permet le calcul des flux et des quantités d'eau apportées ou soustraites au sol. On définit alors la notion de stock d'eau totale ou réserve d'eau totale ( $S$ ), qui correspond au volume d'eau contenu dans un volume de sol donné. Son expression se fait généralement en millimètre d'eau, en harmonisation avec les autres termes du bilan hydrique, que sont la Pluviosité ( $P$ ), le Ruissellement ( $R$ ), le Drainage ( $D$ ) et l'Evapotranspiration réelle (ETR). L'équation générale du bilan hydrique s'écrit :

$$\Delta S = P - R - D - ETR$$

### 3.2.1.2. Réserve utile et disponible.

Un sol ne peut emmagasiner de l'eau indéfiniment, de même une plante ne peut absorber toute l'eau contenue dans le sol. Ces constatations introduisent les concepts de réserve utile (RU) et de réserve disponible (Rd) d'un sol. Deux constantes du sol permettent d'évaluer ces caractéristiques ; ce sont la capacité au champ, qui est le seuil d'humidité maximale au delà duquel l'eau infiltrée ne peut plus être emmagasinée, et le point de flétrissement permanent, qui correspond à l'humidité du sol à partir de laquelle il y a perte de turgescence et flétrissement des végétaux (HENIN, 1976). Le point de flétrissement permanent correspond pour la majorité des végétaux cultivés à pF 4,2 ( $\Phi = -1,6$  MPa), alors que la capacité au champ correspond à des valeurs allant du pF 2 à pF 3 ( $\Phi = -0,01$  à  $0,1$  MPa)(1).

La réserve utile est donc la valeur maximale de la réserve en eau du sol disponible pour les plantes, soit, la différence entre la réserve à la capacité au champ et de la réserve au point de flétrissement(2). Par ailleurs, la réserve en eau du sol, à un moment donné, retranchée de la réserve au point de flétrissement constitue la réserve disponible pour les végétaux.

D'après ces définitions, il est évident que la réserve utile est une constante liée aux caractéristiques intrinsèques du sol étudié (capacité de rétention, porosité, texture et structure). Par contre, pour un sol donné, la réserve disponible varie non seulement avec les propriétés physiques du sol, mais également avec les conditions pédoclimatiques (pluviosité, infiltration, drainage, ruissellement) et avec les potentialités de la plante à extraire cette eau du sol par ses racines, ainsi intervient la profondeur d'enracinement (HILLEL, 1974).

### 3.2.1.3. Densité apparente et vertisols.

L'humidité volumique est liée, par sa définition, à la notion de densité apparente sèche.

Dans le cas des sols riches en argile gonflante de type smectite, la densité apparente est une fonction de la teneur en eau (HILLEL, 1974).

FOX (1964) a modélisé les variations de densité apparente sèche en fonction de l'humidité pondérale. Il détermine ainsi deux phases au

---

(1) Le pF est le logarithme décimal de la charge hydraulique H,  $pF = \log H$ . La charge hydraulique ou charge potentielle totale est une expression quantitative du potentiel de l'eau du sol (c'est une "énergie par unité de poids"). Elle est égale à la somme des charges potentielles gravitationnelle (Hg) et de pression (Hp) (HILLEL, 1974).

(2) Ces concepts de nature statique apparaissent peu significatifs dans un système dynamique. Pour HILLEL (1974) la notion de point de flétrissement est donc arbitraire. CHAIEB (1987) observe, en Tunisie, la floraison d'une espèce telle que *Stipa lagascae* à un potentiel du sol de l'ordre de -3 MPa, et considère que la plupart des espèces de la zone aride, peuvent subsister à des potentiels hydriques inférieurs à -1,6 MPa. Toutefois, nous conserverons le concept originel de "point de flétrissement" afin de comparer les disponibilités en eau suivant les différents aménagements.

cours du dessèchement d'un horizon non travaillé : une phase où les variations de volume sont unidirectionnelles suivie d'une phase où les changements se font dans les trois directions de l'espace. Ces deux phases sont séparées par un point critique qui correspond à l'humidité pour laquelle les fentes de retrait sont totalement fermées. Ces fonctions de variations sont représentées sur la figure 3.3. BERDNT et COUGHLAN (1976) ont contesté ces résultats par des travaux en laboratoire sur échantillons non remaniés. Ils montrent ainsi que les variations de volume, en fonction de la teneur en eau, sont uniquement tridimensionnelles, même au delà du point critique défini par FOX (1964), les variations unidirectionnelles seraient essentiellement liées à la méthode de prélèvement des échantillons.

Ces différents travaux portent en fait sur des sols beaucoup plus argileux (plus de 70 % d'argile), et avec des plages de teneurs en eau plus élevées que celles observées sur les vertisols dégradés de notre site d'étude. Les variations de densité apparente et de leur évolution dans le temps devraient donc être moins importantes que celles observées par ces auteurs, et avoir ainsi moins de conséquences sur la détermination de l'humidité volumique. D'ailleurs, si on extrapole le modèle tridimensionnel de FOX pour des valeurs d'humidité pondérale comprises entre 0,1 et 0,3 g/g, l'erreur sur l'humidité volumique, due à la variation de la densité apparente, serait de l'ordre de 0,01 à 0,03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.

#### 3.2.1.4. Mesures de l'humidité du sol par la méthode neutronique.

La sonde à neutrons permet d'obtenir des données d'humidité *in situ* sans détruire le site, et autorise une répétition des mesures dans le temps aux mêmes endroits. Cette méthode de mesure présente donc un grand intérêt pour les suivis de bilan hydrique.

##### 3.2.1.4.1. Principe de mesure et discussion.

Le principe de la sonde à neutrons est basé sur les propriétés qu'ont les atomes d'hydrogène de ralentir les neutrons rapides. La quantité de neutrons lents produits peut alors être reliée à une concentration en atomes d'hydrogènes, elle même fonction de la quantité d'eau dans le sol.

L'émission des neutrons rapides se fait à partir d'une source radioactive mélange de radium et de béryllium, ou de radium et d'américium. Les neutrons lents sont détectés par absorption par un noyau <sup>10</sup>B, une particule alpha est émise et crée une impulsion électrique comptabilisée par un compteur.

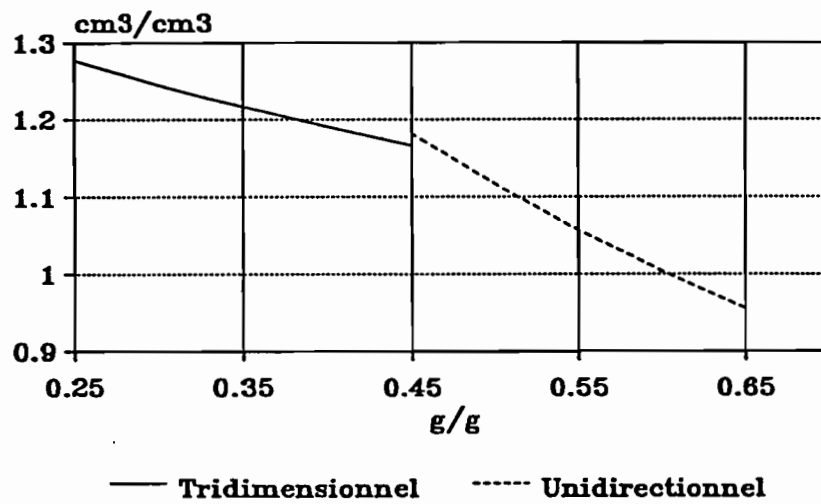


Figure 3.3 : Modèles de relation entre la densité apparente et la teneur en eau selon le modèle de FOX (1964).

L'utilisation de la sonde à neutrons nécessite un étalonnage, qui prend la forme d'une relation linéaire entre le rapport de comptage et l'humidité volumique. Dans notre cas, l'étalonnage de la sonde a été réalisé par le Centre d'Etude Atomique de Cadarache. La méthode consiste en une analyse d'échantillons, sous flux thermique, de neutrons thermiques, permettant la détermination des coefficients d'absorption et de diffusion neutronique du sol (COUCHAT, 1974)(1).

La sonde utilisée est une sonde de type SOLO 20. Les tubes d'accès en aluminium ont un diamètre de 4,5 cm. Nous avons effectué des comptages tous les 10 cm sur les 50 premiers centimètres, tous les 20 cm ensuite. L'étalonnage a été effectué pour chaque horizon décrit sur les sols "hardés" et les vertisols dégradés.

De nombreux auteurs sont sceptiques sur l'utilisation de la sonde à neutrons dans le cas de vertisols. La difficulté principale réside dans la présence de la discontinuité créée par le réseau fissural ; celui-ci créant une contrainte à la dispersion homogène des neutrons. De plus, la présence du tube a tendance à modifier le schéma d'emplacement des fentes (RICHARDS, 1963 *in* GREACEN *et al.*, 1979), ce qui limite la représentativité du tube pour le site étudié. STIRK (1972 *in* GREACEN *et al.*, 1979) estime l'erreur, due au fentes de retrait, entre 10 et 15 % pour les 30 premiers centimètres et à 5 % pour les horizons inférieurs. Ces auteurs suggèrent de multiplier le nombre de tubes par site, afin d'augmenter la représentativité des mesures effectuées sur un vertisol.

#### 3.2.1.4.2. Plan d'installation des tubes d'accès de sonde à neutrons.

Pour les vertisols dégradés, nous avons placé trois tubes d'accès distants de 7 à 8 m par traitement, mais uniquement sur une des 2 répétitions. Le dispositif complet n'a été mis en place que pour la saison 1990. Au cours de la saison des pluies, la périodicité des mesures a été de 6 à 8 jours, sans qu'il soit tenu compte des événements pluviométriques. En saison sèche, les mesures ont été réalisées tous les 15 jours puis tous les mois après les dernières récoltes de sorgho de contre-saison (mois de février).

Sur les sols "hardés", les fentes de retrait sont pratiquement inexistantes, et n'agissent donc pas sur la représentativité des mesures. Nous avons toutefois multiplié le nombre de tubes par

---

(1) Pour un même type de sonde, les coefficients de la droite d'étalonnage dépendent des coefficients d'absorption  $\Sigma_a$ , de diffusion neutronique  $\Sigma_d$  et de la densité apparente sèche (COUCHAT *et al.*, 1975 *in* SCHMIDT et MOUTONNET, 1985).

traitement testé, pour se prémunir de toute hétérogénéité spatiale du sol.

Sur le traitement pitting, le tube d'accès est placé à 50 cm à l'amont du trou. Sur les traitements microcatchment et bandes alternées, un tube est placé au milieu de la bande labourée, un autre est associé sur l'impluvium correspondant.

La pluviosité a été suivie, quotidiennement, grâce à trois pluviomètres, placés à 1,5 m de hauteur ; un sur le site expérimental des sols "hardés", et deux sur celui des vertisols dégradés.

Pour l'obtention d'humidité volumique et compte tenu des principes émis au paragraphe 3.2.1.3, nous avons utilisé des valeurs de densité apparente, mesurées par la méthode des cylindres, au paroxysme de la saison des pluies de 1989.

Les objectifs de l'étude sont de comparer les aménagements réalisés sur un même type sol. L'utilisation des données recueillies grâce à la sonde à neutrons ne pose donc pas, à priori, de problèmes majeurs dans le cadre d'une étude relative, en estimant que, pour un même type de sol, les erreurs liées à la méthode sont identiques.

### **3.2.2. Suivi de la végétation spontanée et des cultures.**

A coté du suivi hydrique des sols, nous avons observé le comportement de la végétation spontanée sur les sols "hardés", et celui des cultures de sorgho de saison des pluies et de contre-saison sur les vertisols dégradés.

#### **3.2.2.1. Suivi de la végétation spontanée des sols "hardés" en voie d'amélioration.**

La méthode utilisée pour suivre l'évolution de la végétation sur les sols "hardés" est celle des points quadrats. Cette méthode permet de caractériser la composition floristique et de quantifier le recouvrement d'une végétation, en mesurant la fréquence de toutes les espèces recensées, et en exprimant, en particulier, cette fréquence en terme de recouvrement.

Le principe est de noter les espèces touchées par une aiguille plantée en un point donné, qui constitue une unité d'échantillonnage. L'interprétation des données fait intervenir les notions suivantes, définies par DAGET et POISSONET (1971) :

- présence : observation d'une espèce dans une unité d'échantillonnage, par exemple sous un point ;

- contact : intersection d'un organe aérien, d'un individu ou d'un taxon avec une ligne de visée ;
- fréquence centésimale d'une espèce : rapport exprimé en pourcentage entre le nombre de présences et le nombre total de points observés ; elle constitue une mesure du recouvrement de l'espèce ;
- contribution spécifique présence (CSP) : rapport exprimé en pourcentage entre la fréquence centésimale de cette espèce et la somme des fréquences centésimales de toutes les espèces. Elle traduit la participation de l'espèce au recouvrement de la surface du sol.
- recouvrement global (R) : rapport exprimé en pourcentage, entre le nombre de points où il y a présence d'espèces et le nombre total des points échantillonnés.

Le suivi a donc consisté en l'observation de 100 points le long d'une ligne de 10 m, matérialisés par un fil tendu, sur chaque parcelle et en distinguant bande labourée et impluvium. Il a été effectué, sur les mêmes emplacements, deux mesures par an. Sur le pitting, étant donné l'hétérogénéité du milieu liée à la présence rapprochée des trous à la surface du sol, le suivi a concerné uniquement les modifications qualitatives de la végétation.

### 3.2.2.2. Suivi des cultures sur vertisol dégradé.

L'objectif sur les vertisols dégradés est la remise en culture, il nous importait donc d'observer le comportement des plantes cultivées en fonction des disponibilités en eau offertes par les différents aménagements testés. Le principe a donc été d'implanter des cultures avec le même itinéraire cultural sur l'ensemble des parcelles du plan d'expérience. Les variétés utilisées sont traditionnelles. Ce choix est justifié par l'option prise de rester proche des conditions du milieu paysan. De plus, les champs cultivés par les paysans aux alentours pourraient servir de référence, contrairement aux variétés améliorées dont l'emploi reste très limité dans la région.

#### 3.2.2.2.1. Suivi du sorgho de saison des pluies.

Le sorgho de saison des pluies employé est le *Sorghum caudatum* sous-série *caffra*. Nous utiliserons pour la suite de l'exposé sa dénomination dans la langue locale à savoir le "djigaari". C'est un sorgho hâtif avec un cycle de 110 à 120 jours ; sa particularité réside dans la couleur rouge ou brune de ses grains à maturité (MARATHEE, 1970).

L'itinéraire cultural adopté est proche de celui pratiqué par les paysans, mis à part les aménagements testés que nous avons mis en

place. Cet itinéraire consiste en un semis direct, réalisé en poquet de 7 à 8 graines au cours de la deuxième quinzaine de juin, avec une densité de 31000 poquets à l'hectare. Au cours du cycle deux sarclages sont effectués à la houe, ainsi que les démarriages pour laisser deux plantes par poquet. Les dates des façons culturales sont décidées avec le paysan avec, comme contrainte, leur application le même jour sur l'ensemble des parcelles expérimentales (IRA-CNS, 1989).

Nous avons observé la croissance et le développement du sorgho à partir de dix placettes repérées par parcelle. Chaque placette comportait 18 poquets et représentait une surface de référence de 5,76 m<sup>2</sup>.

Les mesures et observations effectuées sont :

- les dates limites des différentes phases de développement de la plante : stades de levée, montaison, épiaison-floraison, maturation. Ces dates limites correspondent au moment où 50 % des plantes observées ont atteint le stade considéré ;
- la vitesse de croissance au cours de la phase de montaison ;
- les composantes relatives à l'élaboration du rendement : nombre et poids des épis, nombre et poids des tiges, poids de 1000 grains, rendement.

L'analyse des corrélations entre ces différentes données permet ainsi de déterminer les phases importantes et les facteurs limitants pour l'élaboration du rendement optimal.

Nous avons réalisé également un profil racinaire selon la méthode décrite par CHOPART (1989) au moment où la plante atteint son enracinement maximal.

#### 3.2.2.2. Suivi du sorgho de contre-saison.

Le "muskwaari", *Sorghum durum*, est un sorgho repiqué de contre-saison (EKCKEBIL *et al.*, 1972). La principale variété utilisée dans la région de Maroua est le "Safrari". Le repiquage des plants, obtenus à partir d'une pépinière semée au cours de la première quinzaine d'août, est effectué, après la fin des pluies, de septembre à octobre. Auparavant, la végétation, développée pendant la saison des pluies, aura été fauchée et brûlée. Les trous de repiquage sont distants d'un mètre et confectionnés à l'aide de lourds plantoirs. En 1990, un sarclage fut nécessaire, à cause d'un brûlis insuffisant avant le repiquage.



Selon le même principe que pour le sorgho de saison des pluies, les façons culturales appliquées sont identiques pour l'ensemble de l'expérimentation.

Nous avons observé, selon le même schéma, les différentes phases du développement de la plante, ainsi que les vitesses de croissance. L'enracinement du sorgho de contre-saison a également été décrit, permettant ainsi de situer les horizons de sol participant à l'alimentation en eau de la plante.

L'expérimentation, installée en 1989 dans les friches du terroir de Mouda, a donc pour objectif de tester l'efficacité de certains aménagements hydro-agricoles sur l'amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés. Ce sont ces résultats que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE IV.**

# **AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES TERRES DEGRADEES. RESULTATS DE DEUX ANNEES D'EXPERIMENTATION.**

Les résultats sont abordés par type de sol et de culture. Nous analyserons les profils hydriques et l'évolution des réserves totales et disponibles. Le dispositif expérimental complet en 1990 a permis d'appuyer les résultats par une approche statistique avec une analyse de variance et comparaison de moyennes. Notre analyse sera donc principalement basée sur les données moyennes de cette saison. Les mesures de 1989 serviront à vérifier les hypothèses émises à partir de l'analyse des mesures de 1990.

Après avoir présenté les données pluviométriques des deux années d'expérimentation, nous présenterons d'abord les résultats concernant les sols "hardés" et puis ceux des vertisols dégradés. Chacune de ces parties fera l'objet d'une conclusion partielle sur l'efficacité des différents aménagements réalisés.

#### **4.1. PLUVIOSITE DES DEUX ANNEES EXPERIMENTALES.**

Les résultats des mesures pour les deux années d'expérimentation sont consignés dans le tableau 4.1. La figure 4.1 en donne la représentation graphique.

Les pluviosités annuelles sont relativement proches des données moyennes enregistrées à Salak. Sur les parcelles installées sur le site des vertisols dégradés, on a mesuré 830 mm en 1989 et 813 mm en 1990.

Toutefois, pour les deux années, sur l'ensemble de la saison des pluies, on observe une répartition mensuelle qui se distingue par rapport à la normale. En effet, les pluies mensuelles maximales se situent, pour les deux années, en juin alors que nous avons vu que, sous ce type de climat, les pluies sont habituellement concentrées en juillet et en août. Le décalage est plus net pour l'année 1990, caractérisée par une pluviosité exceptionnelle durant la 3<sup>ème</sup> décade

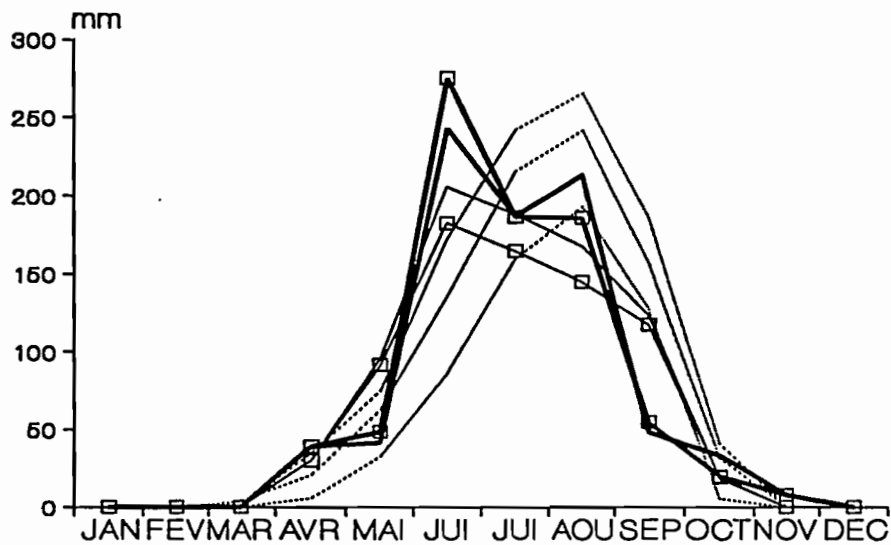


Figure 4.1 : Pluviosité en 1989 (—) et 1990 (—) sur les sites expérimentaux de Mouda, sols "hardés" (•) et vertisol dégradé (◻). Les courbes (···) représentent les 1er et 2ème quartiles et la moyenne, sur les 18 années d'observations sur la station météorologique de Salak.

MOIS		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL														
MOUDA 1989	Hd	0	0	0	30	96	205,7	188,2	167,2	123,5	18	0	0	828,5														
	Vd	0	0	0	30	91,5	182,5	164,5	144,5	117,1	19	0	0	747,8														
	Np	0	0	0	0	0	2	1	0	4	3	5	3	4	4	5	5	3	5	4	2	0	2	1	0	0	0	-
MOUDA 1990	Hd	0	0	0	39	41,6	243	187	213	48	33	8	0	812,6														
	Vd	0	0	0	39	48,6	275	186,5	185,5	54,5	20	8	0	817,1														
	Np	0	0	0	0	1	2	3	1	4	1	4	4	3	4	3	5	5	3	4	3	1	2	0	1	0	0	0
SALAK	1quart	0	0	0,7	34,7	74,8	171,9	242,1	265,3	185,4	40,4	0	0	1015,3														
	moyen	0	0	3,7	20,6	62,9	134,3	215,4	241,3	156,9	30,7	0,35	0	866,1														
	2quart	0	0	0	5,7	32,5	85,3	159,4	192,8	127,5	5,3	0	0	608,5														

Tableau 4.1 : Pluviosité mensuelle en 1989 et 1990 à Mouda sur sol hardé (Hd) et vertisol dégradé (Vd), et de la station de Salak (d'après Olivry 1986). Np représente le nombre de jours de pluie par décade.

de juin, où les pluies ont atteint 200 mm dont 120 mm au cours d'une seule averse, celle du 29 juin. Par contre le mois septembre 1990 fut peu pluvieux, avec un arrêt des pluies en avance d'une quinzaine de jours par rapport à la normale (IRA-CNS, 1989 ; IRA-CNS, 1990).

En 1989, la répartition journalière ne fait pas apparaître de période sèche pendant la saison des pluies. Par contre, en 1990, une période déficitaire est survenue à la fin du mois de juillet et au début du mois d'août ; avec un minimum de 12 mm entre le 12 juillet et le 6 août 1990.

Les deux saisons étudiées présentent donc des scénarios pluviométriques assez différents de ceux obtenus à partir de la moyenne des observations réalisées dans la région.

## **4.2. AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES SOLS "HARDES".**

La réhabilitation des sols "hardés" peut être caractérisée par le suivi du régime hydrique et par l'étude de la végétation naturelle.

### **4.2.1. Modification du régime hydrique des sols "hardés".**

Les critères pour évaluer la modification du régime hydrique sont : les profils d'humidité volumique et l'évolution des réserves hydriques du sol au cours du temps. Nous rappellerons que les principales données exploitées sur les traitements microcatchment et bandes alternées concernent les mesures réalisées sur la bande labourée réceptive du ruissellement issu de l'impluvium correspondant. De même, sur le traitement pitting, les mesures furent réalisées à une distance de 50 cm en amont de la bordure d'un trou (chapitre III).

#### **4.2.1.1. Etude comparée des profils hydriques.**

La figure 4.2 présente les profils hydriques relevés sous différents aménagements en 1990.

Deux comportements hydriques se distinguent :

- sur les traitements bandes alternées et microcatchment, on a, dès les premières pluies, une augmentation de l'humidité volumique sur les 30 à 40 premiers centimètres de

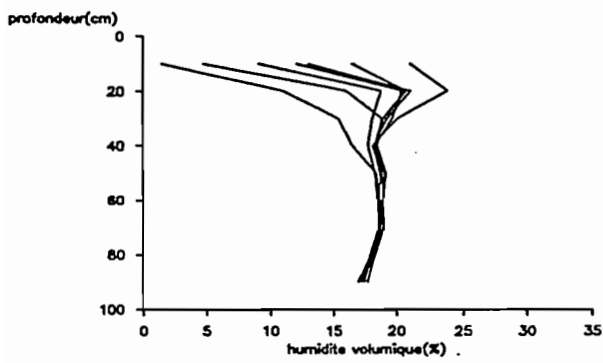
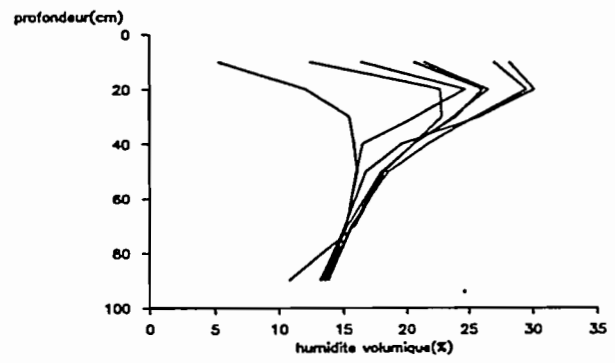
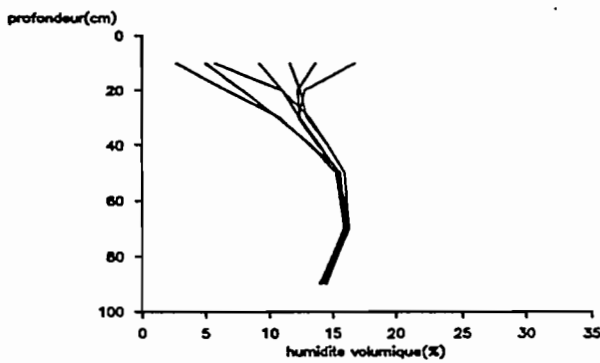
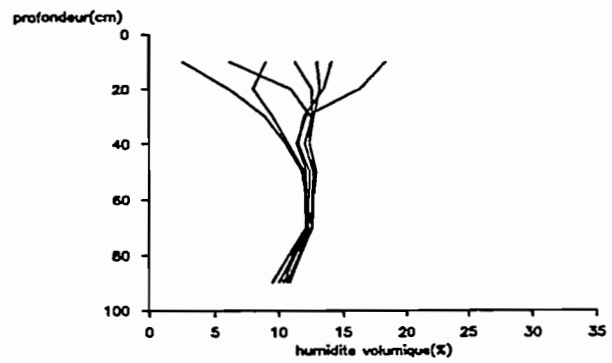
*Bandes alternées**Microcatchment**Pitting**Témoin*

Figure 4.2 : Profils hydriques sur sol "hardé", à différentes dates au cours de la saison 1990, le plus sec se situant le 23 mai et le plus humide le 22 août.

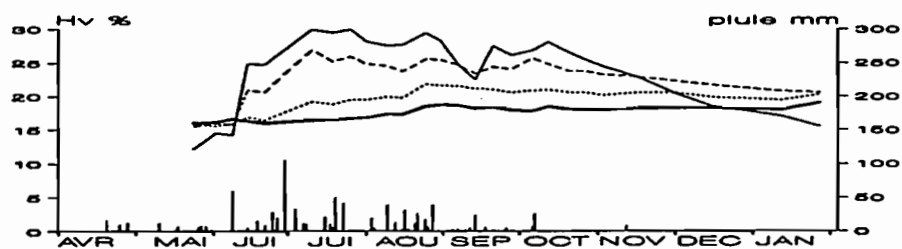
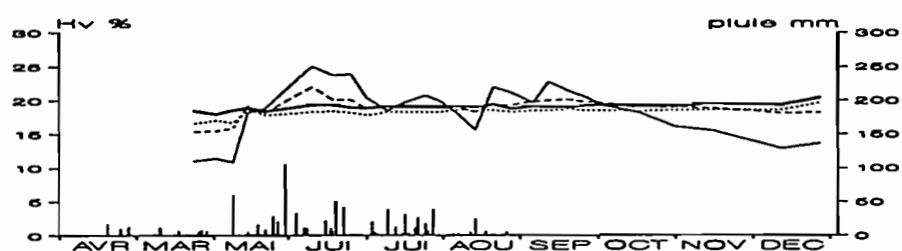
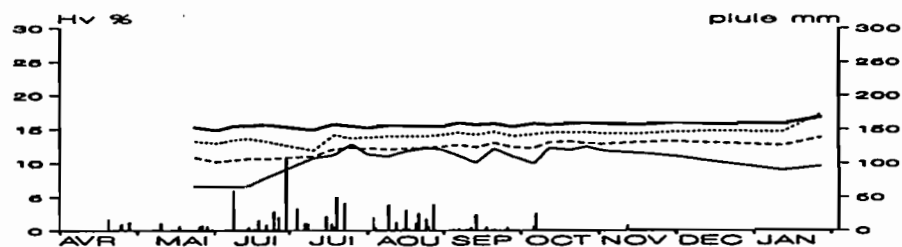
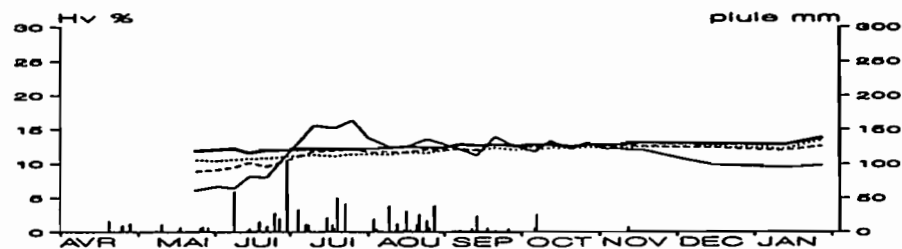
*microcatchment**bandes alternées**pitting**témoin*

Figure 4.3 : Evolution de l'humidité volumique (Hv %) sur sol "hardé" aux profondeurs 20 cm (—), 30 cm (---), 40 cm (···) et 50 cm (—), en 1990. Les histogrammes représentent les hauteurs précipitées journalières.

profondeur, avec un pic d'humidité maximale à 20 cm, suivie d'une diminution progressive jusqu'à une profondeur de 40 cm, à partir de laquelle on note une humidité constante ;

- sur pitting et témoin par contre, le profil présente, à partir de 20 cm, une diminution progressive de la teneur en eau en fonction de la profondeur. On n'observe plus, dans ce profil, de pic présentant une humidité maximale. Les seules variations se situent dans l'horizon 0-20 cm.

Les humidités maximales atteintes constituent un deuxième niveau de différenciation, notamment entre le traitement microcatchment et le traitement bandes alternées. Ceci apparaît nettement sur la figure 4.3, où sont reportées les teneurs en eau en fonction du temps. Les variations ont lieu principalement sur les 40 premiers centimètres. Les humidités volumiques maximales sont plus importantes sur le traitement microcatchment, avec des valeurs comprises entre  $0,18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  à  $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  contre  $0,18$  à  $0,24 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  pour le traitement bandes alternées.

#### 4.2.1.2. Evolution des réserves en eau totale.

La figure 4.4 présente les courbes comparatives d'évolution des réserves hydriques pour les différents traitements, sur les tranches de sol 0-40 cm, 40-100 cm et 0-100 cm.

Les variations d'humidité volumique concernent essentiellement l'horizon 0-40 cm. Pendant toute la saison des pluies, la tranche de sol comprise entre 40 et 100 cm ne présente pratiquement aucune variation de réserve pour les 3 aménagements.

Les réserves mesurées sont significativement différentes entre les traitements bandes alternées et microcatchment d'une part, et les traitements pitting et témoin d'autre part. Toutefois cette différence s'estompe dès que l'on a une baisse notable et prolongée de la pluviosité, comme c'est le cas pour le mois de septembre 1990. De même, la différence est significative entre microcatchment et bandes alternées à partir de la dernière décade de juillet.

Les aménagements microcatchment et bandes alternées modifient donc les réserves hydriques par rapport au témoin, avec respectivement un gain de 50 à 60 mm et de 20 à 30 mm. Sur la tranche 0-40 cm, le pitting ainsi que le témoin présentent, au cours du temps, des variations très faibles des réserves en eau. Les maxima de stockage sont atteints vers la fin de la première décade de juillet, avec un nouveau pic au cours de la troisième décade d'août.



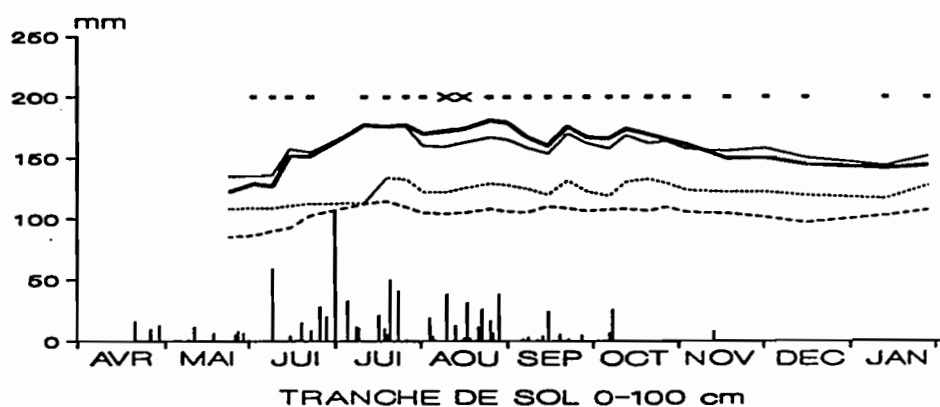
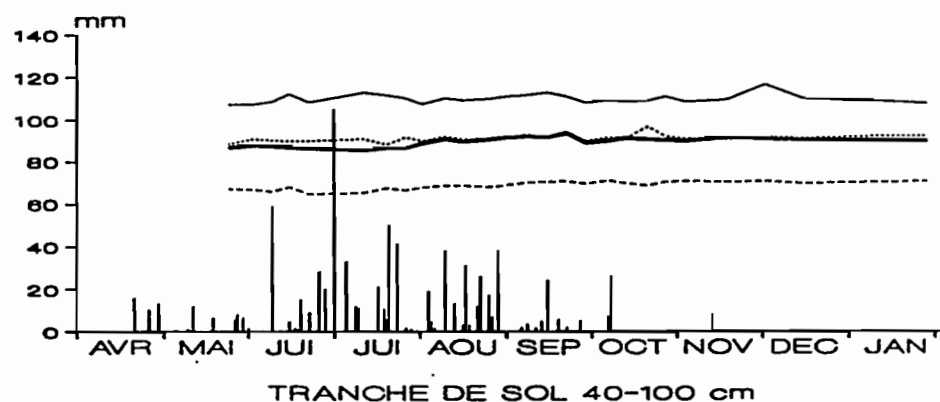
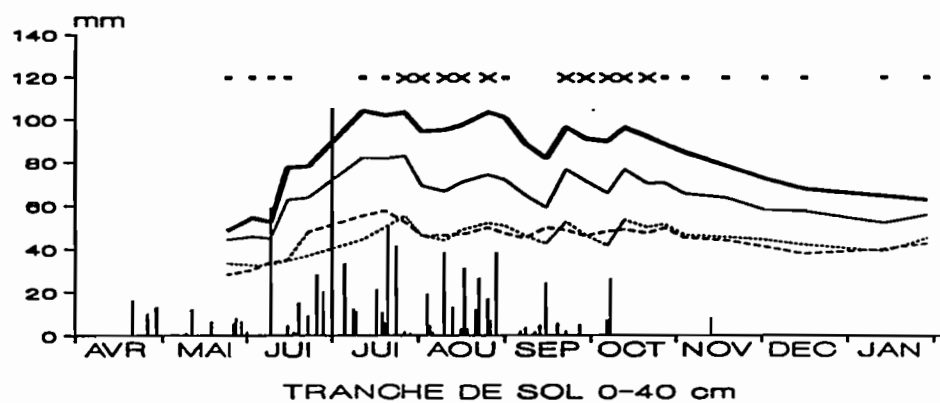


Figure 4.4 : Evolution de la réserve en eau totale sur sol "hardé" en 1990, sur les tranches 0-40 cm, 40-100 cm et 0-100 cm, pour les traitements bandes alternées (—), microcatchment (—), pitting (· · ·) et témoin (---). (-) différence significative  $p = 0,95$  entre tous les aménagements, (x) différence significative  $p = 0,95$  entre bandes alternées et microcatchment. Les histogrammes représente les hauteurs précipitées journalières.

Les calculs sur les réserves disponibles sont peu exploitables. On observe en effet des humidités volumiques supérieures au pF 4,2 uniquement dans les horizons superficiels entre 0 et 20 cm. Le pas de temps des mesures sur cet horizon est trop long pour enregistrer les variations réelles d'humidité. L'estimation des réserves disponibles en est donc occultée. Toutefois, nos observations montrent une disponibilité en eau qui dure 4,9 mois sur le traitement microcatchment, et seulement 1,6 mois pour le traitement bandes alternées. Sur les traitements pitting et témoin, aucune disponibilité en eau n'est observée (tableau 4.2). Nous donnons ces résultats à titre indicatif.

Les variations des réserves en eau du sol suivant le traitement appliqué sont donc effectives sur les 40 premiers centimètres, impliquant des conséquences sur le développement de la végétation naturelle.

#### **4.2.2. Evolution de la végétation en fonction des aménagements testés.**

Le suivi de la végétation, sur les traitements microcatchment et bandes alternées d'une part, et le traitement pitting d'autre part, a été effectué par DONFACK, qui en fera une analyse plus approfondie ultérieurement. Nous lui empruntons ici les données figurant dans les rapports de campagne 1989 et 1990 (IRA CNS, 1989 ; IRA CNS, 1990).

##### **4.2.2.1. Etude de la végétation sur les traitements microcatchment et bandes alternées.**

Les critères de comparaison, obtenus par la méthode des points quadrats, sont le recouvrement global, la richesse et la composition floristique. Par ailleurs des mesures de la biomasse aérienne apporteront un complément d'information.

##### **4.2.2.1.2. Comparaison du recouvrement global et de la richesse floristique entre les traitements microcatchment et bandes alternées.**

Nous rappellerons, dans un premier temps, que ces deux traitements sont composés d'une bande labourée, qui reçoit le ruissellement, et une bande non labourée servant d'impluvium. La bande impluvium n'a subi aucune perturbation contrairement à la

	Réserve hydrique totale maximale (mm)	Cumul des réserves hydriques journalières (Témoïn = base 100)	Réserves hydriques disponibles durée en mois
Bandes alternées	83	148	1,6
Microcatchment	104	188	4,9
Pitting	56	101	0
Témoïn	58	100	0

Tableau 4.2 : Réserves hydriques totales (maxima mesurés et comparaison des valeurs cumulées par rapport au traitement témoïn), et durée de présence de réserves hydriques théoriquement disponibles (en mois), pour l'horizon 0-40 cm et pour la période du 23 mai 1990 au 22 janvier 1991. L'humidité disponible correspond à l'humidité volumique supérieure à celle mesurée à pF 4,2.

		18 juillet 1989		10 juillet 1990		14 août 1990	
		R %	Nsp	R %	Nsp	R %	Nsp
M o y .	bandes alternées	81,3	10	45,0	7,8	84,5	15,9
	microcatchment	66,8	8,5	32,9	7,1	71,9	14,8
	impluvium bande labourée	61,1 86,9	7,6 10,9	37,8 40,2	6,9 7,9	68,6 87,8	12,1 18,7
T e F s t	F (I-L)	32,7 **	6,7 *	0,2 -	1,3 -	9,9 **	41,4 **
	F (BA-MC)	9,1 **	1,4 -	4,8 *	0,6 -	4,8 *	1,1 -
	F interaction	7,8 *	0,1 -	0,9 -	1,8 -	0,0 -	0,2 -
	CV %	5,3	7,5	7,5	5,8	4,8	5,4

Tableau 4.3 : Analyse de variance sur les variables recouvrement (R%) et nombre d'espèces (Nsp) suivant 2 facteurs : aménagement (bandes alternées ou microcatchment), fonction dans l'aménagement (bande labourée réceptrice ou impluvium). Pour le recouvrement, l'analyse est réalisée sur les transformations angulaires.

F(I-L) : F calculé entre les facteurs Impluvium et Bande labourée

F(BA-MC) : F calculé entre les facteurs Bandes alternées et Microcatchment

(\*\*) : différence hautement significative à  $p=0,99$

(\*) : différence significative à  $p=0,95$

(-) : différence non significative

CV : Coefficient de variation (%).

bande labourée ; nous pouvons donc la considérer comme référence, même si elle ne correspond pas exactement à la parcelle témoin (chapitre III).

Les données obtenues par la méthode des points quadrats ont été regroupées selon deux facteurs distincts ; d'une part la bande labourée ou l'impluvium, et d'autre part les aménagements bandes alternées ou microcatchment. Ceci permet d'effectuer une analyse de variance pour 3 relevés effectués à des dates différentes. Le plan d'analyse est un plan factoriel à 2 facteurs avec 6 observations par cas, soit 24 au total. Deux variables sont considérées : le recouvrement global et le nombre d'espèces présentes, ce dernier traduisant l'indice de richesse floristique(1). Les résultats sont consignés dans le tableau 4.3.

Au paroxysme de la saison des pluies 1990, le 14 août, le recouvrement et la richesse floristique sont significativement supérieurs sur les bandes labourées ; avec un recouvrement de 87 % et plus de 18 espèces recensées, contre 68,6 % de recouvrement et 12 espèces recensées pour l'impluvium. Par contre, cette différence n'apparaît pas le 10 juillet 1990. A cette époque, seul le recouvrement global diffère significativement entre les aménagements bandes alternées et microcatchment. Les données du 18 juillet 1989 sont plus difficiles à interpréter ; les résultats indiquent une interaction entre les deux facteurs pour le recouvrement et la richesse floristique.

En résumé, au paroxysme du développement végétal, le labour augmente le recouvrement global et la richesse floristique par rapport à une surface non perturbée.

#### 4.2.2.1.2. Comparaison de la composition floristique entre les traitements microcatchment et bandes alternées.

D'après la figure 4.5, le labour entraîne, de façon très sensible, une diminution de la contribution spécifique de présence (participation de l'espèce au recouvrement) de *Loudetia togoensis*, et une disparition de *Sporobolus festivus* et *Tripogon minimus*, ces deux dernières étant des espèces pérennes. Par contre d'autres espèces telles que *Brachiaria spp*, *Panicum laetum*, et *Setaria sp.* sont très favorisées. *Schoenefeldia gracilis*, très avantagé en début de saison des pluies, apparaît être très concurrencé en fin de saison des pluies, notamment par *Panicum laetum*.

---

(1) Pour le recouvrement global, exprimé en pourcentage, l'analyse est réalisée sur des transformations angulaires.

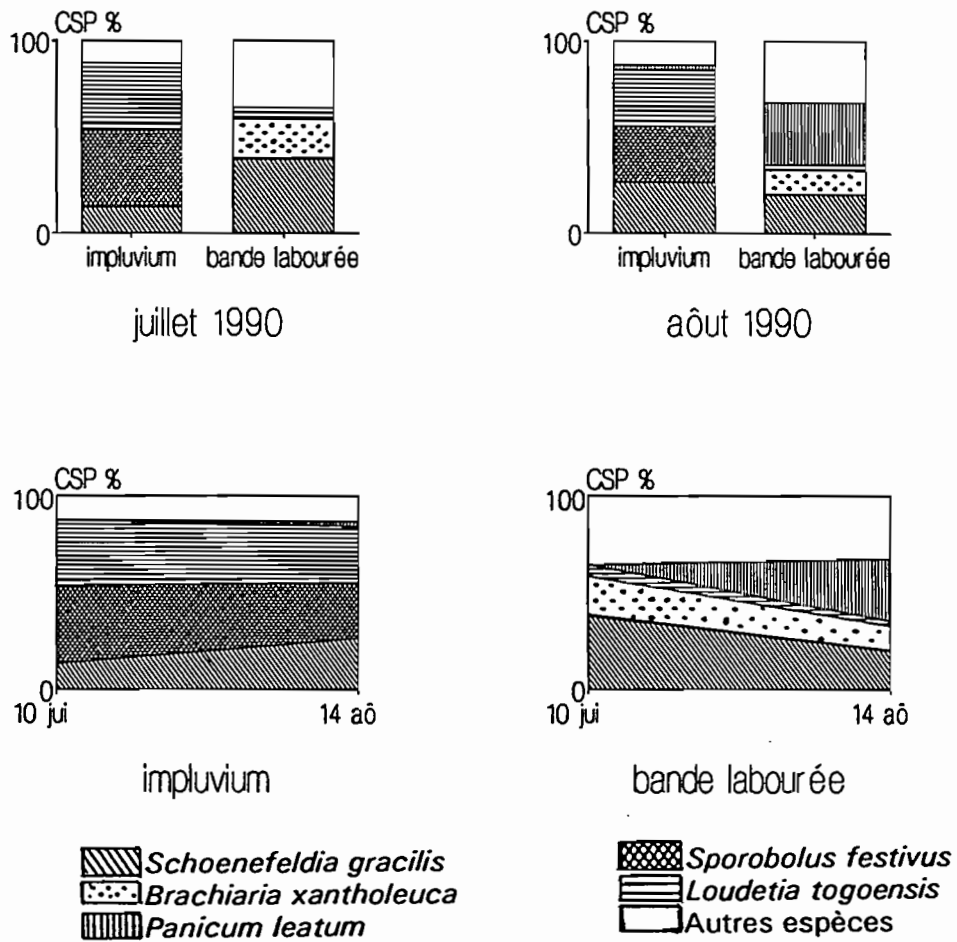


Figure 4.5 : Evolution de la Contribution Spécifique de Présence (CSP %) en 1990, pour les principales espèces sur les sols "hardés", en fonction de la date et de l'aménagement d'après les données de IRA-CNS (1989) et IRA-CNS (1990).

#### 4.2.2.1.3. Production de matière sèche aérienne.

Au paroxysme du développement de la végétation en 1990, les productions de biomasse aérienne sur les bandes labourées ne sont pas significativement différentes entre les aménagements bandes alternées et microcatchment. Sur ces derniers, la production de la bande labourée en biomasse aérienne est de l'ordre de 2,8 T/ha de matière sèche. Par contre, sur la parcelle témoin nous avons mesuré une production de l'ordre de 1,2 T/ha de matière sèche.

#### 4.2.2.2. Etude de la végétation sur le traitement le pitting.

Le traitement pitting est caractérisé par un développement et une croissance hétérogène de la végétation, en relation étroite avec la concentration de l'eau au niveau des trous. L'étude de la végétation a fait apparaître des différences suivant la position par rapport au trou.

En 1989, les trous se sont remplis d'eau dès les premières pluies du mois de juin, pour ne plus se vidanger tout au long de la saison. La végétation s'est alors développée aux abords immédiats du trou, sur une auréole de 20 à 30 cm au maximum. La composition floristique n'a par contre pas été modifiée. A l'optimum de développement, les espèces prépondérantes sont *Loudetia togoensis* et *Schoenefeldia gracilis*. *Sporobolus festivus* et *Brachiaria xantholeuca*, plus précoces, sont alors en phase de déclin. La présence d'eau stagnante a accru la richesse floristique par rapport à la parcelle témoin ; on relevait ici, en septembre 1989, 27 espèces recensées contre 20 espèces sur le témoin.

En 1990, dès le début de la saison des pluies, de nombreuses germinations de graines d'espèces herbacées ont été notées dans les trous, ces graines piégées ont utilisé au mieux les petites pluies de début de saison. La croissance végétale se poursuit jusqu'à l'arrivée des pluies importantes. A partir de ce moment, et contrairement à l'année précédente, les trous se remplissent puis se vidangent plus rapidement, permettant à la végétation de s'y maintenir. On a, toutefois, assisté à une sélection des espèces supportant l'excès d'eau telles que *Echinochloa colona*, *Cyperus sp.*, *Oriza barthii*. L'auréole à croissance rapide autour des trous a également été observée en 1990. Les espèces dominantes sont les mêmes qu'en 1989 : *Loudetia togoensis*, *Schoenefeldia gracilis*, *Sporobolus festivus*, *Brachiaria xantholeuca*, *Panicum leatum*. La richesse floristique a connu une nette augmentation par rapport à l'année

1989 ; on a, en effet, relevé 49 espèces différentes en 1990 contre 27 en 1989.

#### **4.2.3. Discussion sur le fonctionnement des différents aménagements.**

Dans cette discussion, nous distinguerons d'une part le traitement pitting, et d'autre part les traitements microcatchment et bandes alternées.

##### **4.2.3.1. Modification du régime hydrique par le traitement pitting.**

L'aménagement en pitting crée au cours des premières années un système hétérogène, bien caractérisé par la végétation. Les herbacées se concentrent sur une auréole de 20 à 30 cm autour du trou, où les réserves en eau disponible se sont accrues.

A 50 cm du trou, où ont été mesurées les teneurs en eau, aucune amélioration du régime hydrique n'apparaît. Ce fonctionnement remarquable a été confirmé par des mesures d'humidité effectuées par prélèvement à la tarière, dans le trou, et à sa périphérie. La figure 4.6 présente les résultats d'une série de mesures effectuées en octobre 1990 après une pluie de 26 mm. Pour les échantillons prélevés à des distances de 20 cm et de 40 cm, à partir de la bordure du trou, on constate que les teneurs en eau ne sont pas modifiées.

En l'absence de macroporosité fissurale, la circulation de l'eau dans ces sols est donc très lente. Cependant l'observation de l'humectation jusqu'à 50 cm à partir du fond du trou montre que la circulation verticale est plus aisée. Certains auteurs ont mesuré les conductivités hydrauliques sur ce type de matériau ; au Soudan, sur des échantillons remaniés de vertisols, ZEIN EL ABEDINE *et al.* (1969) donnent des valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de 0,01 à 0,4 cm/h entre 20 et 180 cm de profondeur. La circulation de l'eau est donc très limitée, en dehors des fentes de retrait, ce qui explique les faibles volumes humectés.

En deux ans, l'amélioration du régime hydrique reste peu marquée sur ce type d'aménagement. Il sera intéressant de suivre, sur une longue période, l'évolution des profondeurs humectées, ainsi que les dimensions de l'auréole d'humidité marquées par la végétation. En 1990, le fonctionnement a peu évolué, toutefois il semble que les trous se soient vidés plus rapidement, surtout en début de saison des

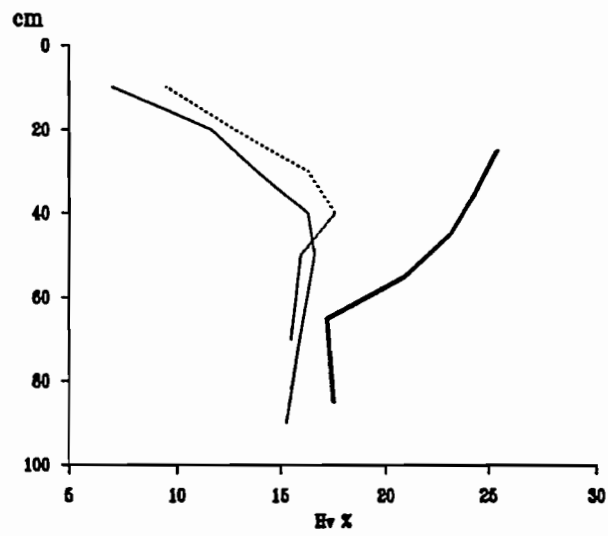


Figure 4.6 : Influence du pitting sur le profil hydrique à 20 cm (—) et 40 cm (---) de la bordure du trou, et dans le trou (—), sur sol "hardé" en octobre 1990.



pluies. Ceci pourrait indiquer l'apparition d'une macroporosité en fin de saison sèche au niveau du trou.

#### **4.2.3.2. Modification du régime hydrique par les traitements microcatchment et bandes alternées.**

L'étude comparée des teneurs en eau pour indique une profondeur d'humectation supérieure sur le traitement microcatchment. La présence de la diguette de retenue confère à ce traitement une efficacité supérieure. Les différences de réserves en eau totale entre les aménagements microcatchment et bandes alternées s'élèvent, au cours de la saison, au maximum à 20 mm sur la tranche 0-40 cm.

Par rapport à une parcelle sans modification de l'état de surface, l'amélioration des teneurs en eau dans la tranche 0-40 cm permet d'augmenter les réserves hydriques totales de 54 mm pour le traitement microcatchment et 25 mm pour le traitement bandes alternées, soit une amélioration relative respectivement de 100 % et 50 % (tableau 4.2).

La question qui se pose est de connaître le rôle joué d'une part par le labour, et d'autre part par la "supplémentation" en eau à partir de l'impluvium. En d'autres termes, la bande labourée, réceptive du ruissellement, bénéficie-t-elle largement des surplus d'eau provenant de l'impluvium, ou la différence des réserves hydriques provient-elle uniquement de l'amélioration des coefficients d'infiltration par le labour?

Nous pouvons tenter de répondre à cette question en comparant les variations de stock hydrique total, entre ces différents traitements, à partir des équations du bilan hydrique, dont les composantes sont exposées schématiquement dans la figure 4.7.

**Détermination d'un coefficient de report de ruissellement de l'impluvium vers la bande labourée.**

Si on considère l'aménagement microcatchment, on peut supposer que le ruissellement au-delà de la bande labourée est nul. Entre deux dates considérées, les équations du bilan hydrique s'écrivent alors :

$$\text{sur l'impluvium} \quad \Delta S_i = P - R_i - ETR_i$$

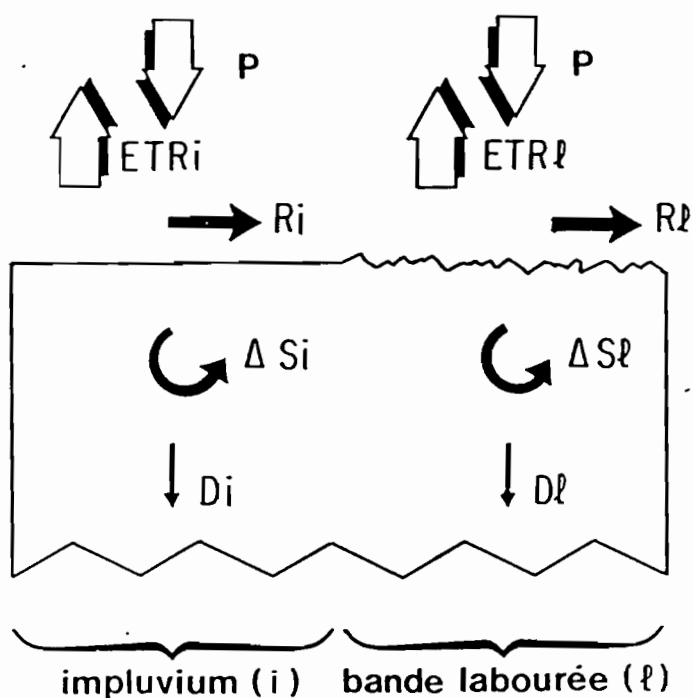


Figure 4.7 : Schématisation du fonctionnement hydrique des aménagements avec impluvium sur sols "hardés".

P : Pluviosité R : Ruissellement

ETR : Evapotranspiration D : Drainage

$\Delta S$  : Variation de la réserve hydrique totale du sol.

date	P	Ri	$\Delta Si$	$\Delta Sl$	$\alpha$	Smc	$\Delta Sba$	Rl
23/5	28	21,1	+1	+6	0	+6	+2	+4
01/6	0	0	0	-2	-	-2	-1	0
08/6	59	47,1	+1	+25	0	+25	+18	+7
14/6	22	16,1	+1	0	0	0	+1	0
21/6	218	180,3	+11	+26	0	+26	+18	+8
09/7	31,5	24,0	+4	-2	0	-2	0	0
17/7	97	78,9	+18	+2	0	+2	+1	+1
24/7								

Tableau 4.4 : Calcul du coefficient  $\alpha$  de report de ruissellement de l'impluvium sur la bande labourée sur microcatchment, et du ruissellement Rl au delà de la bande labourée sur l'aménagement bandes alternées, pour la période du 23 mai au 24 juillet 1990.

sur la bande labourée  $\Delta SI = P + \alpha Ri - ETRI$

avec :

- $\Delta Si$  et  $\Delta SI$  les variations de stock d'eau sur 0-40 cm, sur l'impluvium et la bande labourée respectivement ;
- P la pluviosité ;
- $Ri$  le ruissellement sur l'impluvium calculé d'après la fonction de production donnée par THEBE (1987) :  

$$Ri = 0,838 P - 2,34 ;$$
- $ETRi$  et  $ETRI$  les valeurs d'évapotranspiration réelle sur l'impluvium et la bande labourée respectivement. On les considère identiques en début de saison des pluies, période où la végétation est peu développée, soit  $ETRi = ETRI$  ;
- $\alpha$  est le coefficient de report de ruissellement de l'impluvium sur la bande labourée. Il est positif ou nul.

La différence entre les deux équations s'écrit :

$$\Delta Si - \Delta SI = - (\alpha + 1) Ri$$

$$\text{d'où } \alpha = - 1 + (\Delta SI - \Delta Si) / Ri$$

Les résultats pour le début de la saison des pluies 1990 sont regroupés dans le tableau 4.4.

Aucun coefficient  $\alpha$  calculé n'est positif.

La part de ruissellement produit sur l'impluvium et qui participe à la modification du régime hydrique sur la bande labourée correspondante est donc très faible voire inexistante.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées à la relative inefficacité de la "supplémentation".

La première concerne la faiblesse de la pente du terrain (0,5 % à 1 %), qui ne permet pas un bon report du ruissellement. Par ailleurs, le labour effectué sur la bande en aval de l'impluvium provoque un dénivelé, qui peut s'avérer être un obstacle au ruissellement entrant. L'eau aurait alors tendance à s'accumuler à l'interface des deux bandes ou à contourner la bande labourée. Nous avons effectivement observé, sur la surface du sol et après les fortes averses, une plage d'humidité qui s'étend en amont du labour.

Cependant, l'hypothèse concernant l'égalité des évapotranspirations réelles en début de saison pluvieuse est

discutable. On a notamment observé de nombreuses flaques d'eau sur la bande labourée ; celles-ci deviennent pratiquement permanentes à partir du mois de juillet jusqu'à la fin du mois d'août. L'évaporation sur cette partie est donc certainement plus intense. L'inefficacité apparente de la "supplémentation" serait ainsi due à la faiblesse de la circulation de l'eau en profondeur, limitant de ce fait le stockage de l'eau. Nous rejoignons ici les observations et les propos tenus pour l'aménagement en pitting.

Par rapport à une parcelle témoin, l'amélioration des réserves hydriques, obtenue sur les bandes labourées des traitements microcatchment et bandes alternées, serait due essentiellement au labour. Ce dernier améliore l'efficacité des pluies dans la recharge hydrique du sol grâce à l'ouverture de l'horizon superficiel compact et en limitant le ruissellement par augmentation de la rugosité de la surface du sol.

Des pertes en eau peuvent également provenir d'un ruissellement au-delà de la bande labourée, ce qui expliquerait les différences de réserves hydriques totales entre les traitements microcatchment et bandes alternées.

#### **Détermination des pertes par ruissellement au delà de la bande labourée.**

Pour calculer ces pertes, il nous suffit de comparer les variations de réserve hydrique totale entre les traitements microcatchment et bandes alternées.

On peut considérer que les suppléments d'eau fournis par les impluviums respectifs sont identiques. Bien que l'évaporation du sol pourrait être différente sur ces deux aménagements où la présence d'eau libre peut être variable, nous considérerons que les évapotranspirations y sont guère différente, du fait notamment de la variation non significative en production de la biomasse aérienne. La différence de stock hydrique correspond alors à la quantité d'eau perdue par ruissellement au delà de la bande labourée  $R_l$  ;

$$\text{soit } R_l = \Delta S_{mc} - \Delta S_{ba}$$

avec  $\Delta S_{mc}$  et  $\Delta S_{ba}$  les variations de réserves hydriques totales entre deux dates considérées pour les aménagements microcatchment d'une part et bandes alternées d'autre part.

Les résultats des calculs, pour le début de la saison des pluies, sont consignés dans le tableau 4.4.

La quantité d'eau perdue par le système bandes alternées par rapport au microcatchment est donc très faible, puisqu'elle ne représente que 4,5 % de la pluie tombée lors de la période d'humectation du sol en début de saison des pluies. Au cours d'épisodes pluvieux intenses du début de saison des pluies, comme celui du 9 au 14 juin, les pertes par ruissellement au-delà du labour atteignent 12 % de la pluie tombée. La diguette érigée dans l'aménagement microcatchment aurait donc un intérêt pour les précipitations plus intenses du début de saison des pluies, et elle provoquerait donc une légère différence entre les deux traitements testés.

#### 4.2.3.3. Conclusions à l'étude sur l'amélioration du régime hydrique des sols "hardés".

Les différents aménagements testés ont montré une efficacité différente en ce qui concerne l'amélioration du régime hydrique des sols "hardés".

L'augmentation de la profondeur d'humectation jusqu'à 40 cm de profondeur est cependant très nette pour les aménagements microcatchment et bandes alternées. Au vue des mesures, l'amélioration des réserves hydriques totales semble principalement obtenue grâce au travail du sol ; la faiblesse des conductivités hydrauliques dans les horizons sous-culturels limite l'efficacité d'apports d'eau supplémentaires à partir d'un impluvium. Par ailleurs, le traitement microcatchment montre une efficacité marquée par rapport au traitement bandes alternées, grâce à des pertes par ruissellement moins importantes au delà de la bande labourée.

Le pitting est caractérisé par une humectation du profil, limité à la proximité du trou. Cet aménagement provoque donc une forte hétérogénéité dans le comportement hydrique global de la parcelle.

L'augmentation de l'humidité volumique observée pour ces traitements a permis d'élever les réserves hydriques disponibles pour la végétation. Il en résulte un meilleur taux de recouvrement, une plus grande richesse floristique et des productions de matières sèches aériennes plus élevées.

Toutefois, au bout de deux années, l'amélioration des disponibilités en eau est relativement faible ; elle ne pourrait que difficilement permettre une mise en culture de ces sols.

En dehors de la macroporosité fissurale, qui caractérise des vertisols peu ou pas dégradés, ces sols présentent des conductivités hydrauliques faibles, limitant considérablement les vitesses de circulation de l'eau. Les stagnations d'eau en surface tant sur le pitting que sur les traitements microcatchment et bandes alternées le montrent très nettement. L'amélioration du régime hydrique de façon durable devrait être conditionnée par l'activation d'un réseau fissural.

Après ces deux années d'expérimentation, l'acquisition d'un réseau fissural ne semble pas évidente ; l'observation des horizons supérieurs n'a pas, en saison sèche, révélée la présence de fissuration très nette. Les variations de teneur en eau obtenues par humectation ne sont pas suffisantes pour créer les mouvements de retrait et de gonflement, susceptibles de provoquer une macroporosité fissurale dans les matériaux vertiques.

Ces phénomènes de retrait et de gonflement des argiles sont, selon WILDING et TESSIER (1988), en étroite relation avec des propriétés liées au sol mais aussi avec d'autres caractéristiques. D'après ces auteurs, interviennent dans ces phénomènes non seulement les caractéristiques minéralogiques, chimiques et structurales des argiles présentes, mais également le climat et l'histoire des stress d'origine climatique, la topographie, la végétation et les systèmes de culture pratiqués sur ces sols.

TESSIER (1990) a démontré notamment que l'organisation interne des argiles, à tous les niveaux d'unité structurale, joue un rôle majeur dans les rapports de ces matériaux vis à vis de l'eau. Cette micro-organisation dépend non seulement des caractéristiques minéralogiques de la phase solide, mais aussi des propriétés de la solution de contact (PEDRO, 1987). Ainsi les argiles de type *smectite-Ca* subissent des modifications de structure après une forte dessiccation, qui ont pour effet de diminuer les capacités de rétention en eau de ces argiles au cours d'une nouvelle phase d'humectation (TESSIER *et al.*, 1980).

Il conviendrait donc d'étudier, plus profondément, l'ensemble de ces propriétés sur les sols "hardés" de Mouda, afin d'établir plus précisément les potentialités de réhumectation de ces sols et de mieux connaître les processus de dégradation qu'on y observe.

### **4.3. AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES VERTISOLS DEGRADEES.**

Les résultats de l'étude sur le régime hydrique, et l'adéquation des cycles culturaux avec les réserves en eau disponibles sur les vertisols dégradés sont abordés dans un premier temps par type de culture : *culture de saison des pluies* et *culture de contre-saison*. Dans un deuxième temps, à partir de ces résultats, nous discuterons globalement du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés et des conséquences que l'on peut en tirer pour préconiser des méthodes de réhabilitation.

#### **4.3.1. Modification du régime hydrique des vertisols dégradés cultivés en saison des pluies.**

Les critères de l'analyse de la modification du régime hydrique par les différents traitements, "labour + buttage", "labour" et le témoin, sont d'une part le suivi des profils hydriques du sol et l'évolution des réserves hydriques totales, et d'autre part le comportement agronomique du sorgho de saison des pluies.

##### **4.3.1.1. Suivi des profils hydriques et évolution de l'humidité volumique au cours du temps.**

Les figures 4.8, 4.9 et 4.10 présentent l'évolution des teneurs en eau au cours de la saison des pluies, ainsi que les profils hydriques en phase d'humectation et de dessèchement.

Au début de la saison des pluies, les parcelles, où sont appliqués les trois traitements, sont dans un même état hydrique, avec des teneurs en eau variant de  $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  à  $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  entre 0 et 100 cm de profondeur.

L'humectation des 40 premiers centimètres a lieu après les deux épisodes pluvieux du mois de juin ; celui du 8 juin correspondant à une pluie de 59 mm et celui du 24 au 29 juin à 182 mm. Les humidités volumiques maximales, atteintes dans cet horizon début juillet, sont à peu près équivalentes pour les trois traitements : de l'ordre de  $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  à  $0,37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Durant toute la saison des pluies, les teneurs en eau, entre 20 et 40 cm de profondeur, restent stables. Les variations les plus importantes ne sont enregistrées que dans les 20 premiers centimètres.

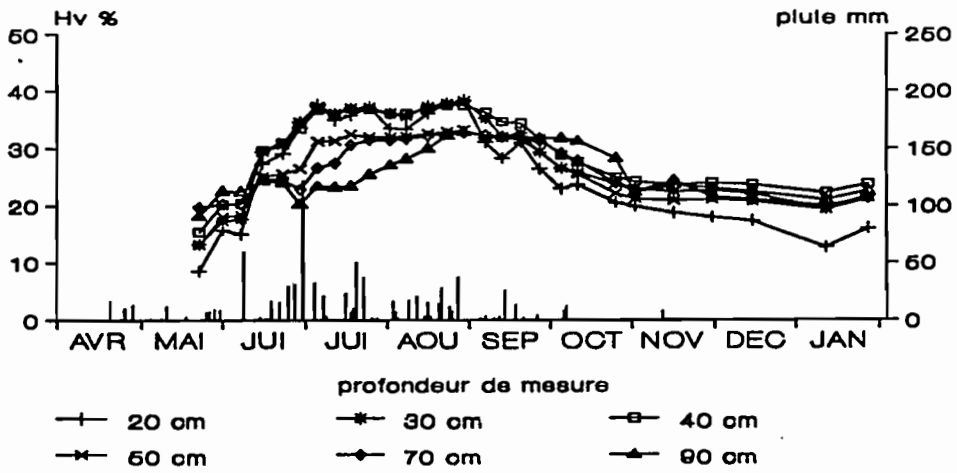
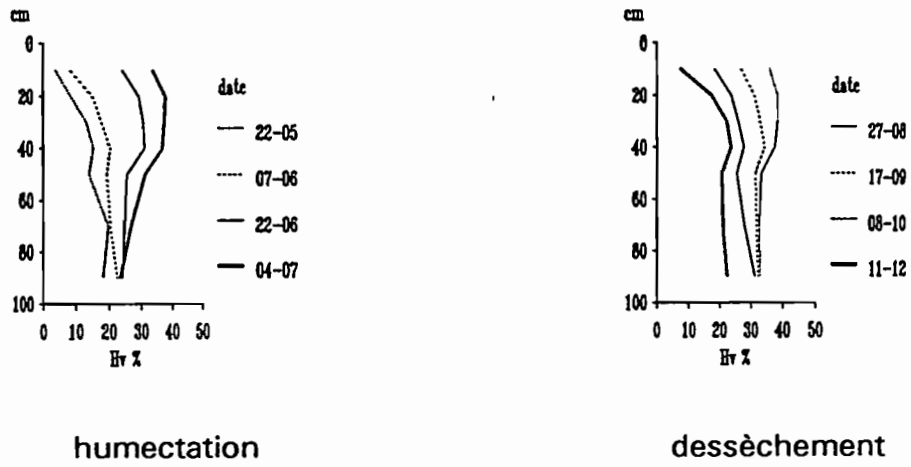


Figure 4.8 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec labour+buttage et culture de saison des pluies, en 1990.



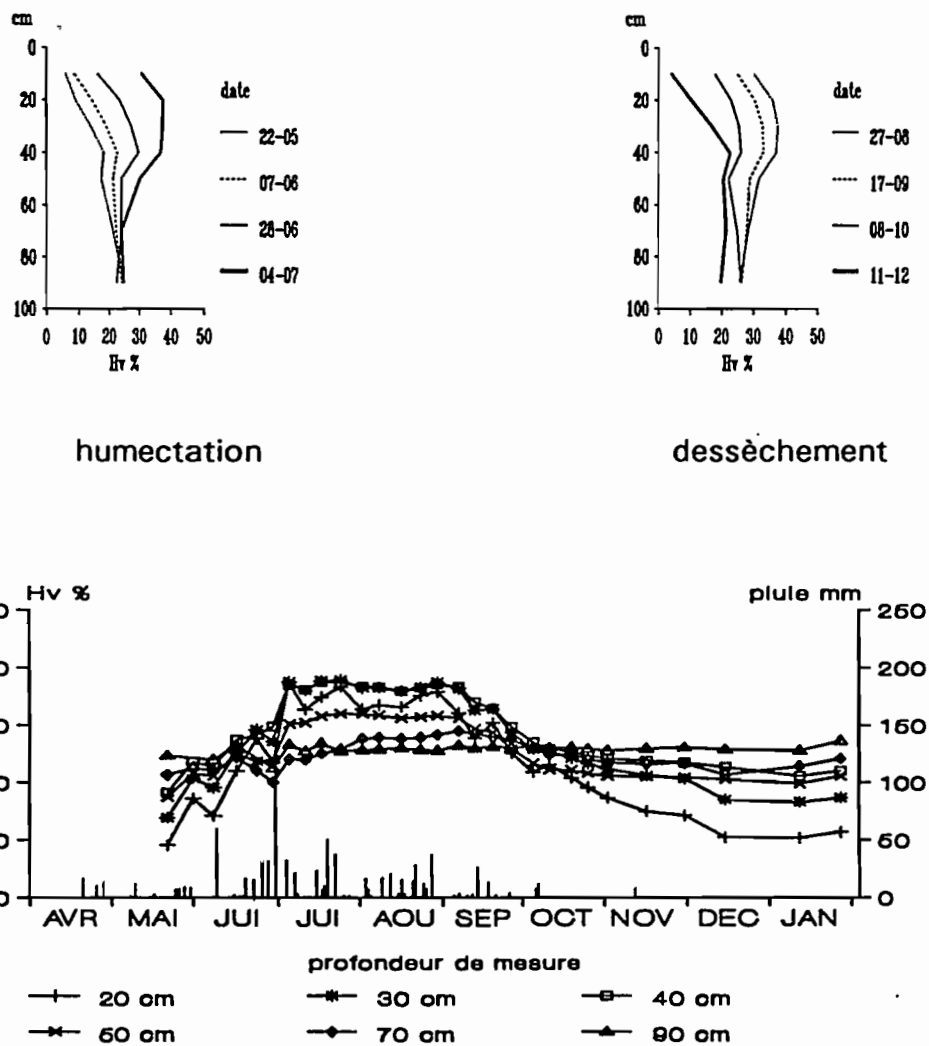


Figure 4.9 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec labour seul et culture de saison des pluies, en 1990.

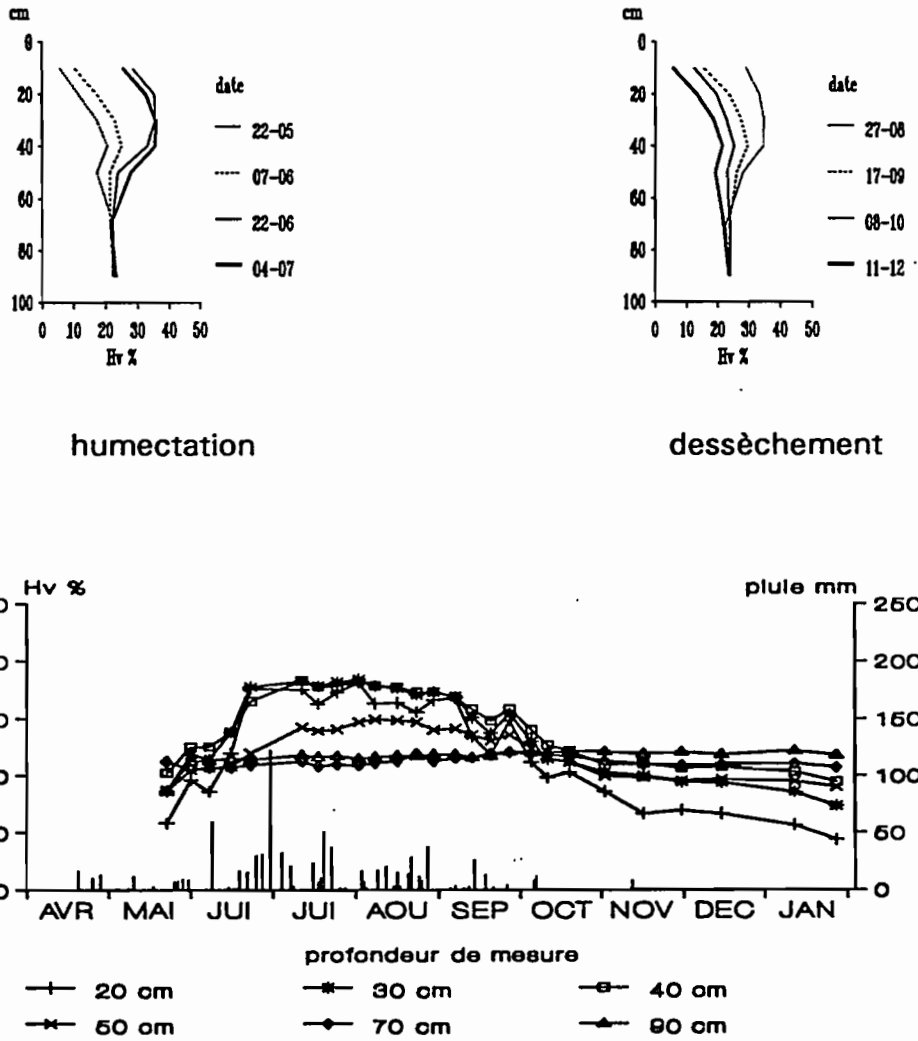


Figure 4.10 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle témoin et culture de saison des pluies, en 1990.

Les humidités volumiques des horizons inférieurs (50-100 cm) évoluent différemment. Elles se situent à 50 cm de profondeur, à un niveau intermédiaire ;  $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  atteint au début du mois de juillet, après la pluie du 29 juin. A partir de 70 cm de profondeur, apparaît une différence entre les traitements. *Sur le témoin* les teneurs en eau restent à un niveau à peu près constant, autour de  $0,22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . *Sur le traitement labour* l'augmentation à 70 cm est très légère, passant de  $0,22$  à  $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Par contre, *sur les parcelles buttées*, les teneurs en eau augmentent à 70 cm et à 90 cm de profondeur. Cette humectation est plus lente que celle observée dans les horizons supérieurs, un maximum de  $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  est relevé à la mi-juillet à 70 cm, un autre de  $0,32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  est atteint vers la 3<sup>ème</sup> décade d'août à la profondeur de 90 cm.

Le buttage augmente donc la profondeur d'humectation. L'évolution comparée des teneurs en eau à 70 cm révèle une différence significative, au risque de 5 % d'erreur, entre les trois traitements (figure 4.11). Par rapport aux autres traitements, cette différence apparaît sur la parcelle buttée depuis la mi-juillet jusqu'à la 3<sup>ème</sup> décade de septembre, alors qu'entre les traitements labour et témoin, elle se manifeste uniquement durant le mois d'août.

A partir du mois de septembre, la baisse de la fréquence des pluies amorce le dessèchement du profil. Celui-ci concerne dans un premier temps les horizons supérieurs, compris entre 0 et 40 cm, puis ensuite les tranches de sol de 50 à 70 cm. Le dessèchement est rapide et identique jusqu'à la mi-octobre pour les trois traitements, de l'ordre de  $0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3/\text{jour}$  entre 30 et 40 cm de profondeur ; il se ralentit ensuite et s'arrête à un niveau d'humidité équivalent à celui de la fin de la saison sèche précédente. Dès le 22 octobre, les profils hydriques des trois traitements sont très proches. Cependant pour le traitement buttage, on observe le maintien, à 90 cm de profondeur, d'humidité élevée jusqu'à la première décade de novembre, alors que les horizons sus-jacents continuent à se dessécher. A partir de mi-décembre tous les profils hydriques se stabilisent.

Ces résultats indiquent donc essentiellement une augmentation de la profondeur maximale humectée pour le buttage. Cette augmentation existe, mais d'une façon moins marquée, pour le traitement labour. Sur les 50 premiers centimètres, aucune différence sur les teneurs en eau n'apparaît. Ces observations rejoignent celles qui ont été faites à l'issue de l'année 1989 (IRA-CNS, 1989).

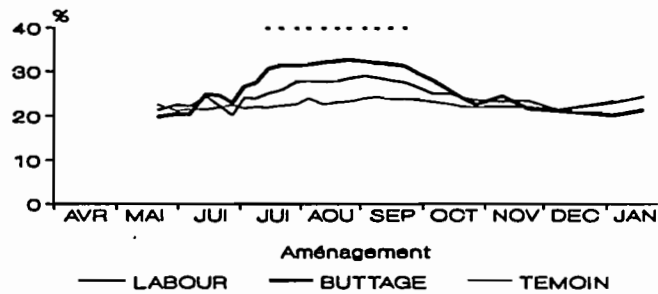


Figure 4.11 : Evolution comparée de l'humidité volumique en 1990, à la profondeur de 70 cm, pour les traitements labour, labour avec buttage et témoin. La marque (\*) indique une différence significative entre les trois traitements au risque d'erreur de 5 %.

date	horizon	buttage	labour	témoin	pluie
17/08/89	0-50	171	179	166	512,5
	50-100	160	115	117	
28/10/89	0-50	109	100	95	828,5
	50-100	121	110	110	
27/08/90	0-50	183	172	159	733,6
	50-100	164	134	117	
08/10/90	0-50	130	115	105	808,1
	50-100	150	128	119	

Tableau 4.5 : Réserves en eau totale (mm), à différentes dates au cours des années 1989 et 1990, pour les différents aménagements sur vertisols dégradés cultivés en saison des pluies.

#### **4.3.1.2. Evolution des réserves en eau des vertisols dégradés sous culture de saison des pluies.**

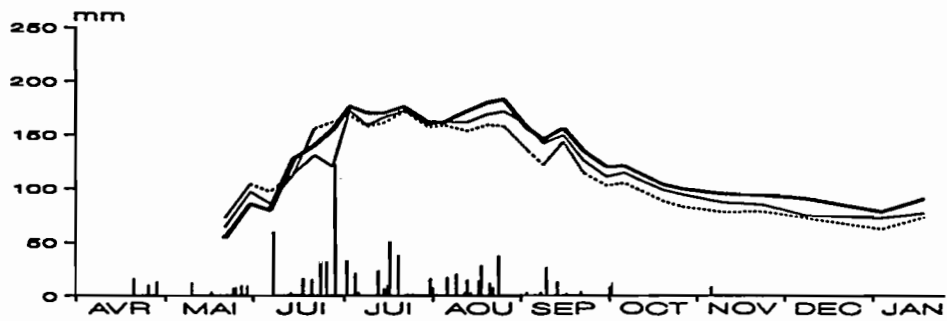
Après l'étude de l'évolution des teneurs en eau, nous avons distingué la présence de deux réservoirs dans le profil du vertisol dégradé, un premier situé entre 0 et 50 cm et un deuxième entre 50 et 100 cm. La figure 4.12 illustre l'évolution des stocks d'eau total sur ces horizons au cours de la saison.

La réserve en eau augmente rapidement dans la tranche de sol comprise entre 0 et 50 cm, et se maintient autour de 160 mm, depuis le début du mois de juillet et jusqu'au début du mois de septembre, à partir de là, la baisse des réserves hydriques est amorcée. Entre les trois traitements, les différences ne sont pas significatives sur cette tranche de sol. Par contre, une différence apparaît dans le réservoir 50-100 cm, pour lequel l'augmentation de la profondeur d'humectation par le buttage entraîne un stockage accru de l'eau. A ce niveau, la réserve hydrique n'augmente pas pour le témoin, et seulement très légèrement pour le traitement labour. Cette différence entre les réserves hydriques se maintient jusqu'au début du mois d'octobre. Le tableau 4.5 présente les valeurs de stock hydrique à la fin du mois d'août et au début du mois d'octobre. Les mesures de 1989, réalisées à partir d'un nombre de tubes d'accès restreints, indiquent une même tendance des résultats.

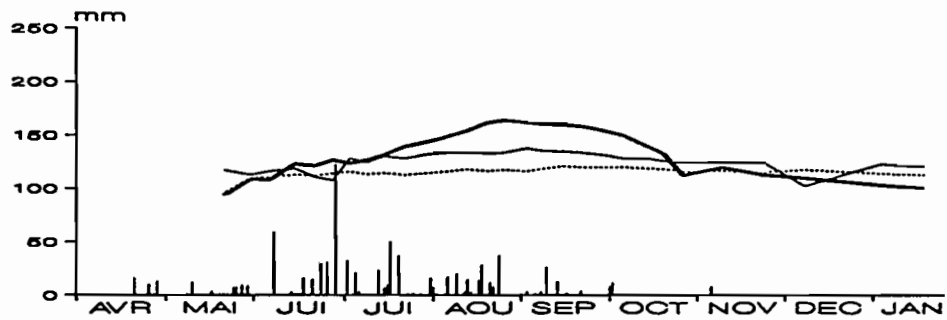
Globalement, sur l'horizon 0-100 cm, le labour n'améliore pas significativement les réserves en eau du sol par rapport au témoin (figure 4.12). Le buttage, par contre, offre un gain significatif de 30 à 50 mm sur les réserves en eau totale, pour une période allant de la première décade de juillet jusqu'à la fin du mois de septembre. Ce gain est concentré entre 50 et 90 cm de profondeur. Nous allons voir l'incidence de ce fonctionnement hydrique différencié sur le comportement d'une culture de sorgho.

#### **4.3.1.3. Comportement d'une culture de saison des pluies pour les différents aménagements testés.**

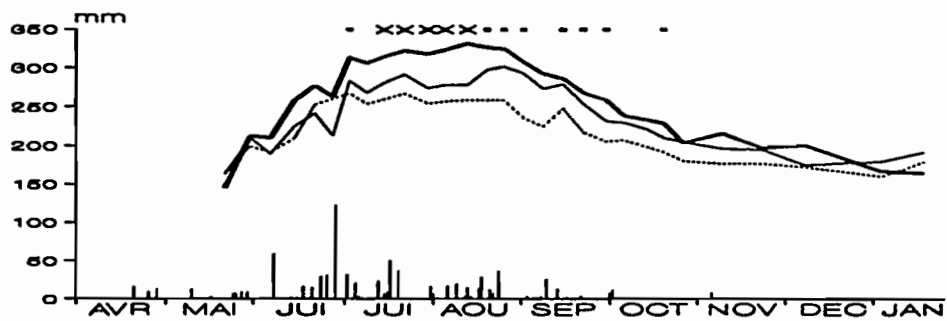
Avant de comparer l'effet des différents traitements sur la culture de sorgho en saison des pluies, il est intéressant de connaître les modalités de l'élaboration du rendement, et de connaître ainsi les phases du cycle cultural qui ont un rôle primordial, pour l'obtention d'un rendement optimal.



tranche de sol 0-50 cm



tranche de sol 50-100 cm



tranche de sol 0-100 cm

Figure 4.12 : Evolution comparée du stock d'eau total en 1990, sur les tranches 0-50 cm, 50-100 cm et 0-100 cm pour les itinéraires avec labour (—), labour+buttage (---) et témoin (···), sur vertisols dégradés et sous culture de saison des pluies.

La marque (·) indique une différence significative au risque de 5 % entre les 3 traitements à la date considérée, (x) indique une différence significative au risque de 5 % entre les traitements labour+buttage et labour.

#### 4.3.1.3.1. Elaboration du rendement du sorgho sur vertisols dégradés.

L'analyse en composantes principales est une méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous forme graphique le maximum de l'information contenue dans un tableau de données. Le principe est de transformer  $p$  variables quantitatives initiales, toutes plus ou moins corrélées entre elles, en  $p$  nouvelles variables quantitatives, non corrélées, et appelées composantes principales<sup>(1)</sup>(PHILLIPEAU, 1986).

Les variables prises en compte sont les données relevées sur les 60 placettes de l'expérimentation, à savoir :

- la longueur de la phase de levée, c'est à dire du semis au stade début montaison (LONGL) ;
- la longueur de la phase de montaison (LONGM) ;
- le nombre de grains par épis (NGREP) ;
- le poids de 1000 grains (P1000) ;
- la densité d'épis au m<sup>2</sup> à la récolte (DENS2) ;
- la hauteur de la plante en fin de montaison (HAUT3) ;
- la vitesse de croissance durant la phase de montaison (VIT) ;
- la production de matière sèche aérienne totale (MS).

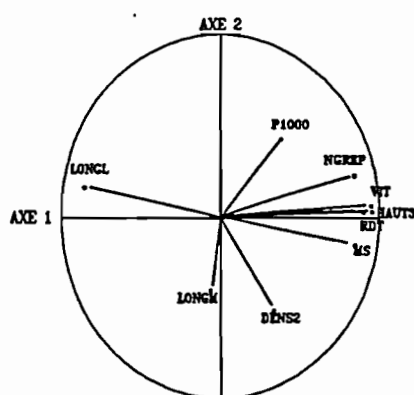
La variable rendement (RDT), qui représente la variable à expliquer, est considérée comme variable supplémentaire.

Les résultats sont présentés sur la figure 4.13, ils sont analogues pour les 2 années.

D'après les cercles de corrélation, 4 variables sont fortement corrélées à l'axe 1 qui contribue pour 48 % à la variation totale en 1989 et 47,1 % en 1990. Ce sont la longueur de la phase de levée, en opposition aux variables qui caractérisent la croissance de la plante ; c'est à dire la vitesse de croissance (VIT), la hauteur en fin de montaison (HAUT3) et la quantité de matière sèche aérienne (MS). Cette 1<sup>ère</sup> composante principale correspond à un indice de vigueur du développement et de croissance de la culture. Le rendement (RDT) est fortement corrélé à cet axe. Nous pouvons donc considérer que l'élaboration du rendement a été fortement conditionnée par l'acquisition d'une biomasse aérienne importante. La phase d'installation de la culture semble à cet effet également

---

(1) Les composantes principales sont en fait des combinaisons linéaires des  $p$  variables initiales pour lesquelles la variance des individus est maximal. La composante principale, qui présente une contribution maximale à la variance totale, est appelée première composante principale (PHILLIPEAU, 1986).



Diagonalisation: Valeurs propres (variances sur axes principaux)

axe 1: 4,3182      axe 2: 1,7204

Contribution à la variance totale

axe 1: 48,8 %      axe 2: 19,1 %

variable	Composantes principales axe 1		Composantes principales axe 2	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
LONGL	-0,8511	0,7245	0,2481	0,0616
LONGM	-0,0690	0,0048	-0,5994	0,3593
NGREP	0,8499	0,7223	0,3426	0,1174
MS	0,8521	0,7261	-0,2303	0,0530
HAUT3	0,9611	0,9237	0,0467	0,0022
VIT	0,9546	0,9112	0,0950	0,0090
P1000	0,4009	0,1607	0,6443	0,4152
DENS2	0,3541	0,1254	-0,7674	0,5889
RDT	0,9077	0,8238	0,0415	0,0017

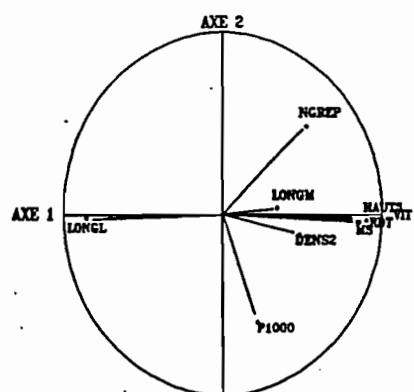
(a) 1989

Diagonalisation: Valeurs propres (variances sur axes principaux)

axe 1: 3,7688      axe 2: 1,3816

Contribution à la variance totale

axe 1: 47,1 %      axe 2: 17,3 %



variable	Composantes principales axe 1		Composantes principales axe 2	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
LONGL	-0,8553	0,7315	-0,0284	0,0008
LONGM	0,3611	0,1304	0,0547	0,0030
NGREP	0,5450	0,2971	0,7357	0,5412
MS	0,8667	0,7512	-0,0676	0,0046
HAUT3	0,9085	0,8253	-0,0481	0,0023
VIT	0,8540	0,7294	-0,0586	0,0034
P1000	0,2341	0,0548	-0,8935	0,7984
DENS2	0,4992	0,2492	-0,1673	0,0280
RDT	0,7959	0,6334	-0,0148	0,0002

(b) 1990

Figure 4.13 : Cercles de corrélations des analyses en composantes principales sur les composantes du rendement du sorgho pluvial (Djigaari) en 1989(a) et 1990(b), à partir des 60 observations sur les 6 parcelles expérimentales.

LONGL : longueur de la phase de levée, en jour (du semis au stade début montaison)

LONGM : longueur de la phase de montaison, en jour;

NGREP : nombre de grains par épis;

P1000 : poids de 1000 grains, en gramme;

DENS2 : densité d'épis au m<sup>2</sup> à la récolte;

HAUT3 : hauteur de la plante en fin de montaison, en centimètre;

VIT : vitesse de croissance durant la phase de montaison, en centimètre par jour;

MS : production de matière sèche aérienne totale, en tonne par hectare;

RDT : rendement en grains, en tonne par hectare.

r : Corrélations entre variables et axes principaux

r<sup>2</sup> : Corrélations au carré



primordiale. Les facteurs, tels que le climat et les techniques culturales, qui ont favorisé une levée rapide après le semis puis une croissance forte pendant la phase de montaison, ont permis l'obtention d'un rendement optimal.

#### **4.3.1.3.2. Influence des différents traitements sur la culture de sorgho de saison des pluies.**

Suite à l'étude de l'élaboration du rendement, nous avons comparé l'effet des traitements par des analyses de variance sur les différentes variables.

Les résultats des 2 années sont consignés dans le tableau 4.6.

Les coefficients de variation sont en général relativement élevés. Ceci est dû à une forte hétérogénéité intraparcellaire. Cependant des différences hautement significatives apparaissent et nous pouvons donc tirer quelques conclusions.

La première remarque concerne la présence d'une différence significative entre les blocs ; celle-ci révèle donc la présence d'une hétérogénéité du terrain d'essai, indépendante des traitements appliqués. Le bloc 2 a présenté des engorgements de surface plus importants. L'interaction traitement - bloc n'est pas significative ; la culture a donc montré des différences entre traitements allant dans le même sens sur les deux blocs.

D'autre part, les moyennes de rendement et des variables précédemment déterminées qui lui sont corrélées sont significativement différentes entre les traitements au risque de 1 %. Les tests de comparaison de moyennes (test de NEWMANNS et KEULS) donnent pour les 2 années un avantage significatif au traitement labour. Le traitement buttage + labour se classe entre les traitements témoin et labour en 1989 et, il n'est pas significativement différent du témoin en 1990.

Le labour offre donc les meilleurs rendements sur ce type de sol sur les deux années d'expérimentation. Son action favorise la levée des plantes, en assurant un meilleur lit de semence par rapport à une parcelle non labourée. Les raisons peuvent être l'acquisition d'un milieu plus aéré, la présence d'un meilleur drainage externe ainsi que d'un "flash" de minéralisation à la suite du travail du sol. La dépréciation du rendement par le buttage est due à la présence d'un excès d'eau en surface, qui provoquerait un ralentissement de la croissance pendant la montaison. HODGSON et CHAN (1982) ont noté l'effet néfaste d'engorgement de surface sur des vertisols

	LONGL	HAUT3	DENS2	NGREP	MS	P1000	RDT
Labour	45,1 a 28,2 a	231,5 a 231,4 a	5,69 - 5,33 -	1219 a 1464 a	7,34 a 8,03 -	28,33 - 26,80 -	1,70 a 2,09 a
Buttage	51,1 b 29,9 a	174,5 b 193,4 b	5,37 - 5,78 -	529 b 1111 b	4,59 b 8,51 -	30,80 - 26,80 -	0,95 a 1,71 b
Témoïn	52,6 b 33,6 b	183,9 b 121,2 c	5,65 - 4,83 -	598 b 952 b	4,10 b 4,64 -	27,08 - 26,20 -	0,89 b 1,22 c
Bloc 1	48,8 - 28,8 -	215,0 a 210,6 a	5,56 - 5,35 -	884 - 1379 a	6,33 a 7,97 -	30,56 a 26,80 -	1,48 a 1,98 a
Bloc 2	50,8 - 31,9 -	178,2 b 153,4 b	5,58 - 5,28 -	600 - 973 b	4,36 b 6,15 -	26,92 b 26,50 -	0,87 b 1,37 b
Ft	14,62 ** 16,41 **	19,62 ** 27,34 **	0,55 ns 6,55 ns	8,44 ** 12,10 **	21,35 ** 25,64 **	2,86 ns 2,20 ns	9,44 ** 13,64 **
FB	3,35 ns 14,33 **	21,26 ** 21,46 **	0,00 ns 0,10 ns	1,83 ns 21,75 **	20,32 ** 14,44 **	7,89 ** 1,11 ns	12,85 ** 19,97 **
Finter	1,32 ns 2,92 ns	0,94 ns 2,92 ns	0,38 ns 1,51 ns	0,03 ns 1,22 ns	1,47 ns 5,10 **	0,62 ns 0,12 ns	0,35 ns 1,43 ns
CV(%)	8,5 10,4	15,7 39,8	18,7 15,7	74,7 28,7	31,7 26,3	17,5 4,2	55,7 31,6

Tableau 4.6 : Analyses de variance sur les composantes du rendement d'une culture de saison des pluies (sorgho de variété traditionnelle) sur vertisol dégradé, en 1990 (chiffre du haut) et en 1989 (chiffre du bas).

Ft : F traitement; FB : F bloc; Finter : interaction traitement bloc.

ns : Non significatif au risque 5%; \*\*: significatif au risque 1%.

a,b,c : Désignation des groupes de moyennes significativement différents selon test de NEWMANN et KEULS.

cultivés sous irrigation gravitaire en Australie, la principale conséquence de ces engorgements temporaires est la baisse de l'aération du sol, qui limite les mécanismes d'absorption racinaire et provoque des phénomènes de nécrose.

#### 4.3.1.3.3. Profils racinaires du sorgho de saison des pluies sur les vertisols dégradés.

Nous avons réalisé un profil racinaire le 15 octobre, sur des plantes en fin de cycle, au moment où l'enracinement est maximal. La méthode utilisée est celle de la grille ; elle consiste en un comptage de racines sur une paroi verticale creusée au niveau du collet de la plante ; le comptage se fait dans des mailles de 5 x 5 cm.

Notre manque d'expérience pour cette technique et la difficulté de l'observation des racines dans ce type de sol très argileux ne nous ont pas permis de dégager des résultats statistiques probants. La figure 4.14 représente un exemple de la répartition obtenue. On peut observer ainsi un enracinement ne dépassant pas les 70 cm de profondeur avec une concentration de racines sur une demi-sphère de 20 cm de rayon autour du plateau racinaire, la répartition des racines apparaît homogène ensuite sur l'ensemble des profils jusqu'à 60 cm. Il est intéressant de noter que l'horizon prospecté et utile semble se situer entre 0 et 60 cm. L'amélioration hydrique obtenue par le buttage se situe essentiellement au-delà de 50 cm voire 70 cm, or il s'agit d'une zone peu utilisée par la plante pendant son cycle de développement. Par contre la concentration de l'enracinement sur les 20 premiers centimètres rend les plantes très sensibles au mauvais drainage externe qu'occasionne le buttage durant la croissance.

#### 4.3.1.4. Evolution des disponibilités en eau sous culture de saison des pluies.

Les réserves en eau disponibles sont calculées à partir de l'équation 1 :

$$Rd = \int_0^z (Hv - Hv_{pF4,2}) dz \quad (1)$$

La figure 4.15 représente, pour les trois traitements, l'évolution des stocks d'eau disponibles aux différentes profondeurs. Sur les graphiques sont indiquées également les dates des principales phases du cycle de la culture de sorgho de saison des pluies.

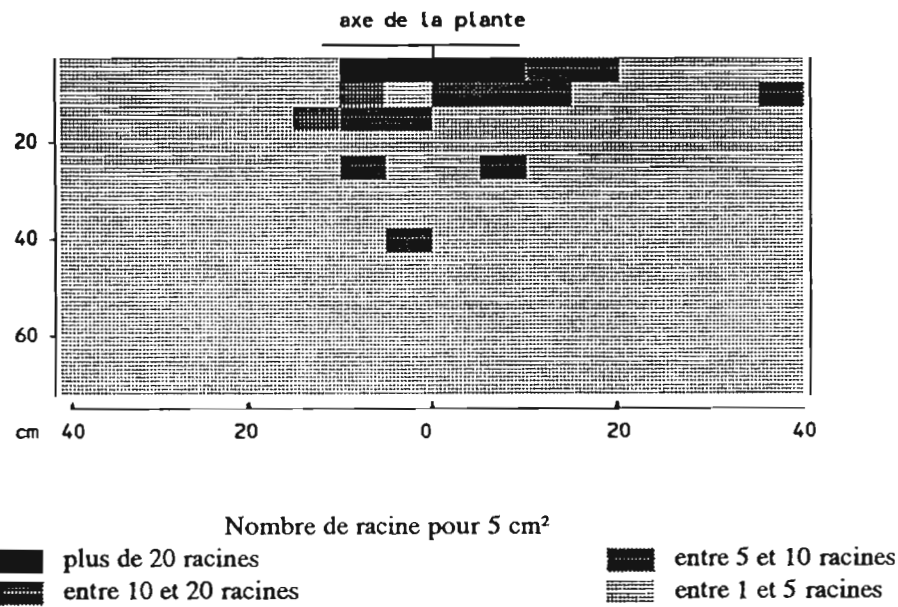
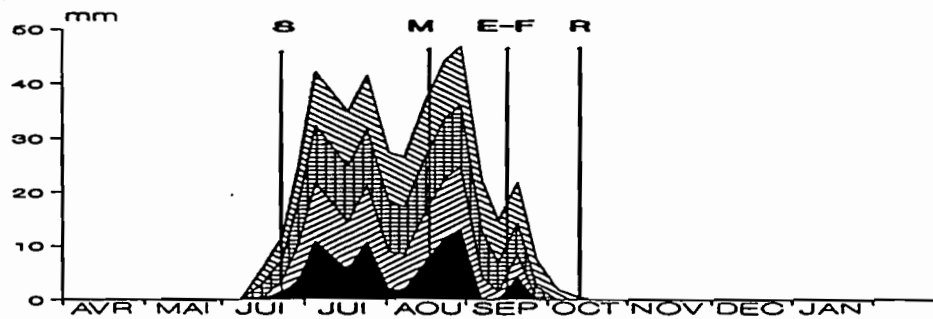
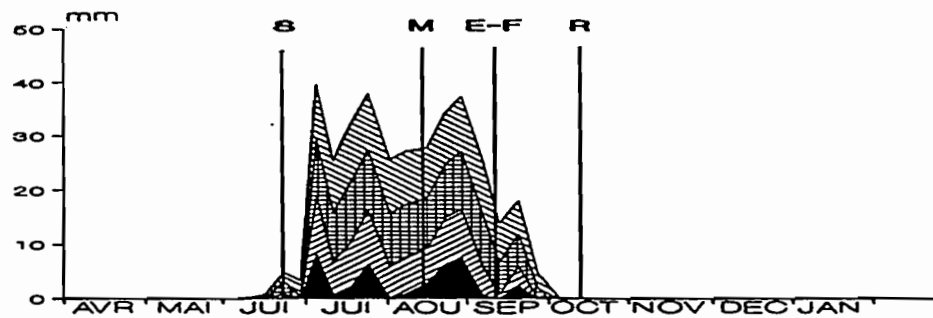


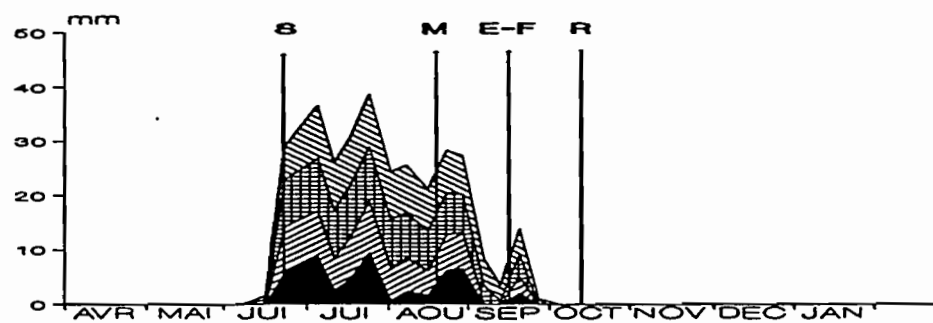
Figure 4.14 : Profils racinaires, sur parcelle labourée, au paroxysme du développement d'un sorgho de saison des pluies sur vertisols dégradés en 1990; méthode de la grille d'après CHOPART (1989), plan de coupe au niveau de la plante, maille élémentaire de 5 cm x 5 cm.



buttage



labour



témoin

Figure 4.15 : Evolution des réserves hydriques disponibles, en 1990, sur vertisols dégradés, et sous culture d'un sorgho de saison des pluies, sur les tranches de sol 0-10 cm ■, 0-20 cm ▨, 0-30 cm ▩, 0-40 cm ▪. Les différentes phases du cycle de la plante sont indiquées S semis, M début montaison, E-F épiaison-floraison, R récolte.

La répartition des réserves hydriques disponibles est homogène sur les 40 premiers centimètres, tout au long de la saison des pluies. La disponibilité en eau serait, par contre, pratiquement inexistante en dessous de 40 cm de profondeur, pour les 3 traitements.

La réserve théoriquement disponible<sup>(1)</sup>, entre 0 et 40 cm, est plus importante sur les parcelles buttées, où elle se maintient à un niveau compris entre 27 et 47 mm pendant les mois de juillet et août, alors que la disponibilité en eau se situe entre 25 et 40 mm sous labour et entre 21 et 39 mm sur la parcelle témoin.

La disponibilité en eau existe donc tout au long du cycle. Aucune phase culturale ne semble souffrir de déficit hydrique, exception faite de la phase de maturation du grain avant la récolte. Toutefois l'analyse des observations agronomiques, dans nos conditions expérimentales, a montré que la maturation et le remplissage n'apparaissent pas comme des phases critiques sur l'élaboration du rendement. Rappelons que pour les trois traitements, le sol présente des réserves disponibles au cours du mois de septembre 1990, bien que, avec plus de 100 mm de déficit par rapport à la moyenne, celui-ci ait été particulièrement sec (paragraphe 4.1).

#### **4.3.1.5. Conclusions sur l'efficacité des traitements en condition de culture de saisons des pluies.**

Le tableau 4.7 résume les résultats obtenus. Le buttage est plus efficace pour le stockage de l'eau dans les vertisols dégradés. Les gains en stock hydrique se situent essentiellement dans les horizons profonds, entre 50 et 100 cm de profondeur. Le labour sans buttage n'améliore pas significativement les réserves hydriques totales du sol par rapport à un itinéraire cultural traditionnel.

Cependant, l'évolution des stocks disponibles en saison des pluies a montré que l'alimentation en eau n'apparaît pas comme le principal facteur limitant de l'élaboration du rendement d'une culture de sorgho sur les vertisols dégradés. Au contraire, une des contraintes est l'engorgement excessif des horizons supérieurs qui diminue significativement le rendement, c'est ce qui se produit notamment après un buttage.

Le comportement des vertisols dégradés en saison des pluies est proche de celui des vertisols modaux, dont l'handicap majeur d'une

---

(1) Différence entre l'humidité à la capacité au champ et celle au point de flétrissement (chapitre III).

	labour		labour + buttage		témoin	
	1989	1990	1989	1990	1989	1990
réserves hydriques totales * horizon 0-100 cm	98	100	109	105	100	100
réserves hydriques disponibles * horizon 0-100 cm	102	101	137	120	100	100
durée de présence réserves hydriques disponibles (mois)	3,48	3,66	4,03	3,56	3,83	3,34

\* indice de comparaison par rapport au témoin = base 100

Tableau 4.7 : Comparaison, entre les différents traitements, des réserves hydriques totales et disponibles (indice par rapport au témoin base 100), et de la durée de la disponibilité en eau (en mois), sur vertisol dégradé cultivé en sorgho de saison des pluies. Les indices de comparaison sont calculées à partir des valeurs cumulées de réserves hydriques totales et disponibles pour les périodes 1989 (15 juin 1989 au 7 mai 1990) et 1990 (22 mai 1990 au 22 janvier 1991).

mise en culture pendant cette période est de présenter des risques d'engorgement excessif. Le vertisol dégradé, bien que présentant une déficience hydrique par rapport au vertisol modal, semble donc exiger, malgré tout, des aménagements pour assurer un meilleur drainage externe pendant la saison pluvieuse. Nous reviendrons au chapitre suivant sur les possibilités de minimiser cette contrainte.

#### **4.3.2. Modification du régime hydrique des vertisols dégradés sous culture de contre-saison.**

Comme pour l'étude précédente, l'analyse porte sur le suivi des profils hydriques, l'évolution des réserves en eau du sol, et le comportement agronomique d'une culture de sorgho de contre-saison.

Rappelons que la culture de contre-saison consiste en un repiquage de plants de sorgho en fin de saison des pluies. La plante effectue donc son cycle en puisant dans les réserves hydriques du sol accumulées au moment de la mise place de la culture. L'état des réserves hydriques du sol en fin de saison pluvieuse sera donc le principal facteur conditionnant la réussite d'une culture de contre-saison ; nous l'utiliserons d'ailleurs comme principal critère de comparaison entre les différents aménagements.

##### **4.3.2.1. Suivi des profils hydriques et de l'évolution des humidités volumiques sous culture de contre-saison.**

Les figures 4.16, 4.17 et 4.18 présentent l'évolution des teneurs en eau au cours du temps et à différentes profondeurs de mesures.

Là encore, la phase d'humectation concerne dans un premier temps les horizons supérieurs (0 à 50 cm). L'humectation des horizons plus profonds est par contre beaucoup plus lente.

Les différents aménagements présentent un comportement particulier après les 2 épisodes pluvieux du mois de juin.

*Sur l'aménagement microcatchment*, la tranche comprise entre 20 et 40 cm est humectée après les pluies du 9 et 28 juin, le maximum est atteint à la fin de la première décade de juillet ( $0,36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ). Entre 50 et 70 cm, les teneurs en eau augmentent plus lentement, le maximum ( $0,31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) est atteint début septembre.

*L'aménagement en casiers* a un comportement différent. Les teneurs maximales en eau, à 30 et 40 cm de profondeur sont plus élevées ( $0,40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) et atteintes plus rapidement, l'humidité



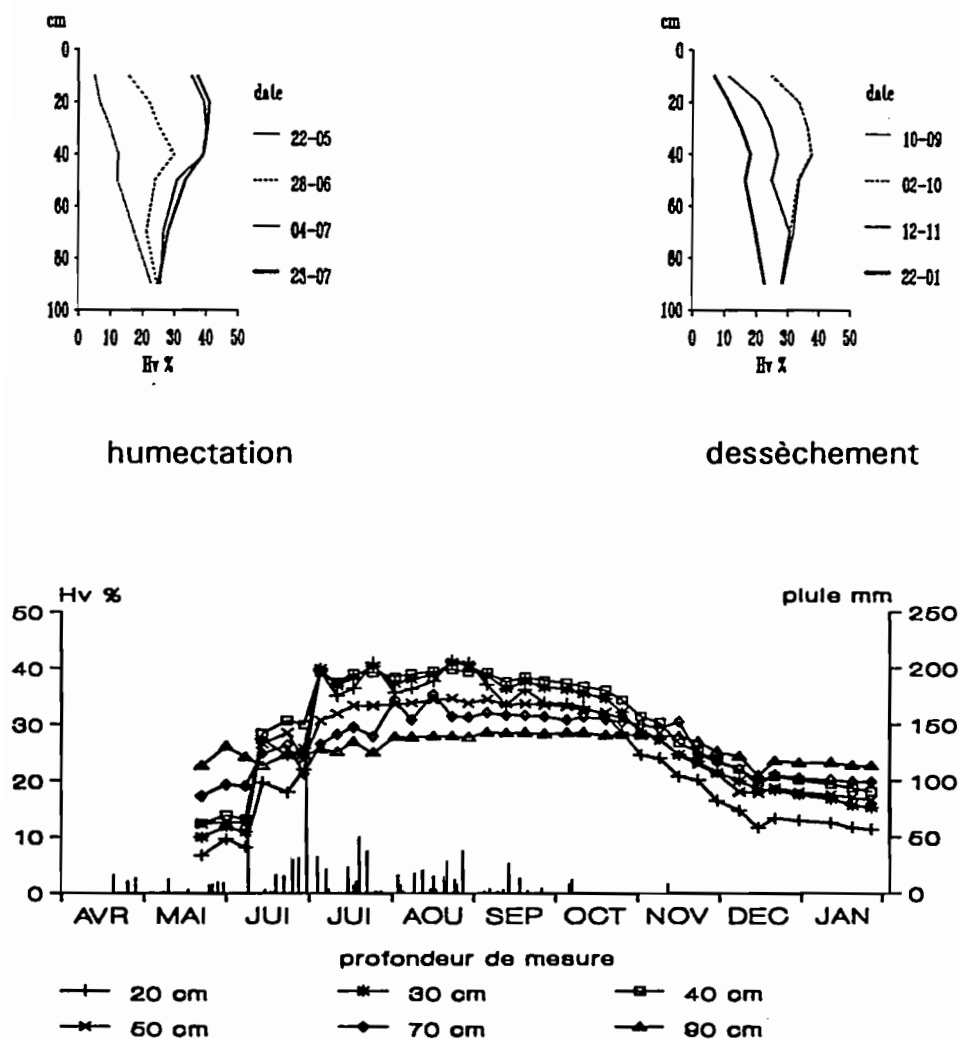


Figure 4.16 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec aménagement en casiers sous culture de contre-saison en 1990.

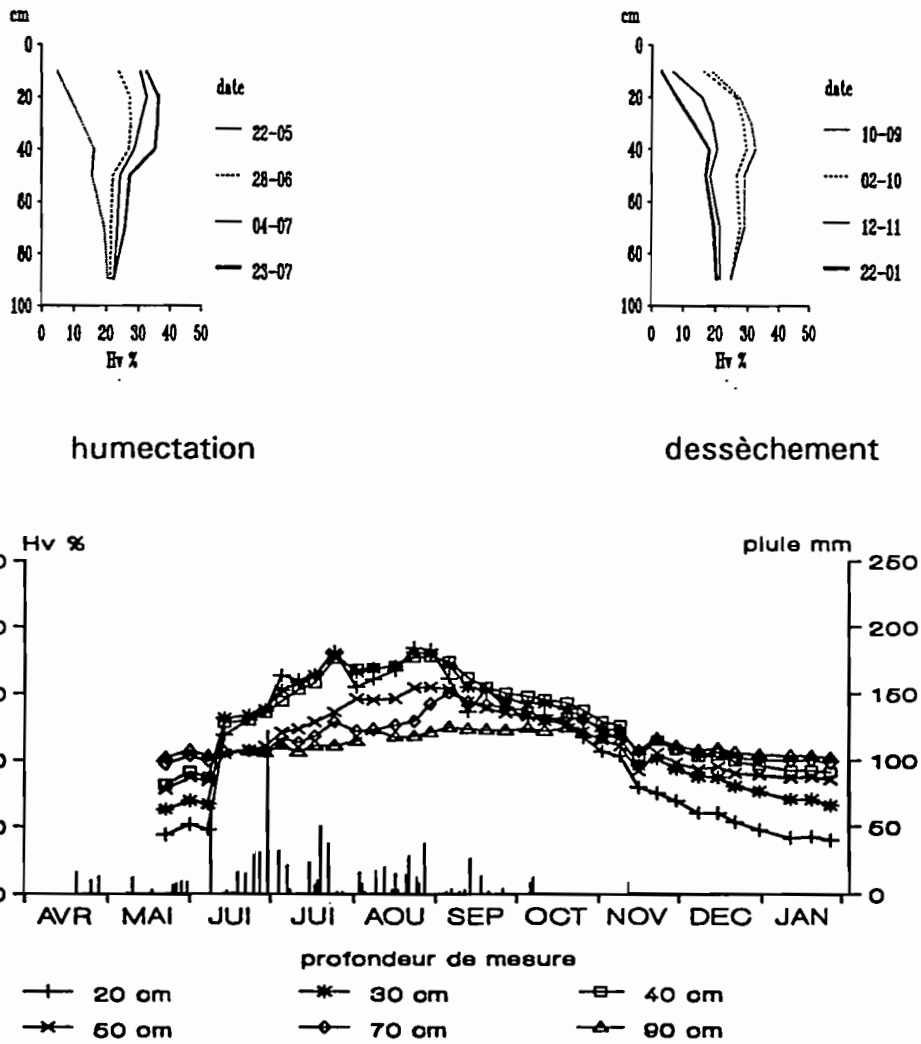


Figure 4.17 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec aménagement en microcatchment sous en culture de contre-saison en 1990.

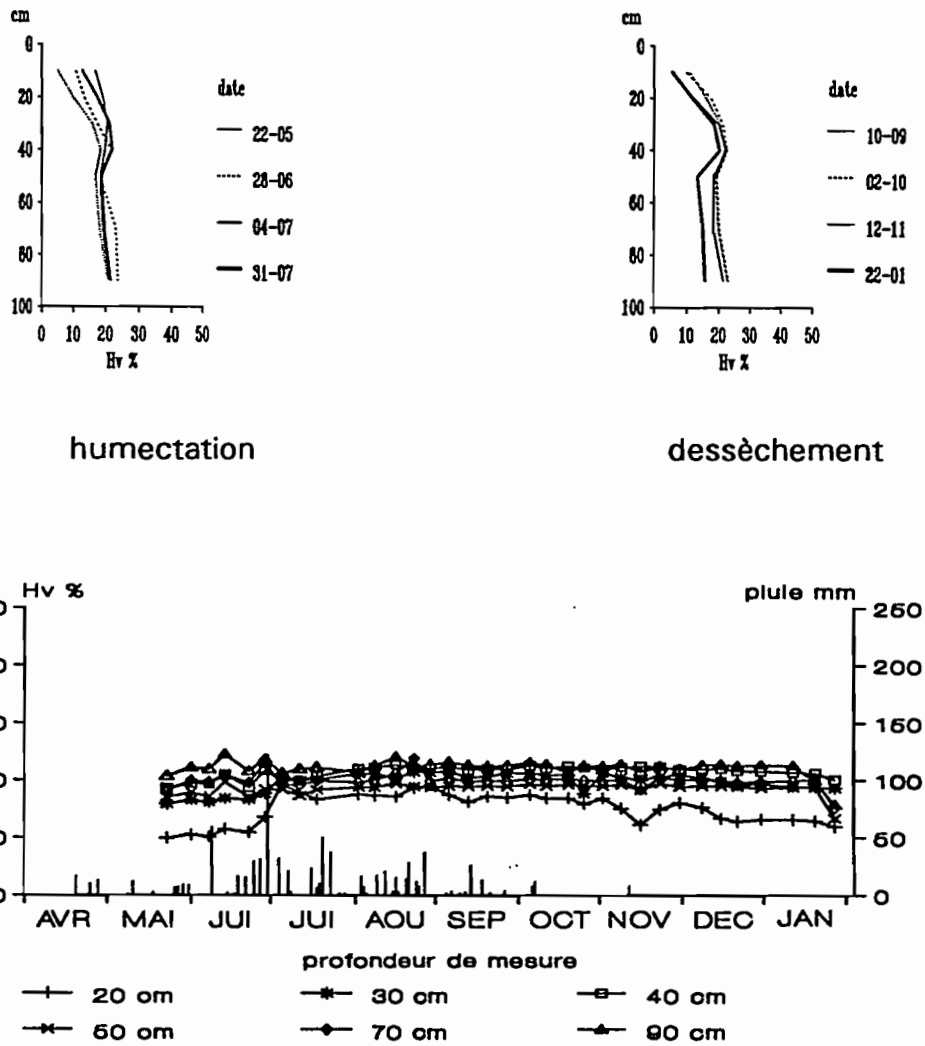


Figure 4.18 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle témoin sous en culture de contre-saison en 1990.

maximale est relevée dès le début de la première décade de juillet. L'humidité à 50 cm s'établit à une valeur intermédiaire ( $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) dès la mi-juillet. A 70 cm, l'augmentation de l'humidité volumique a lieu après la pluie du 9 juin, puis l'évolution devient plus lente, aucune réaction n'est observée après l'épisode du 28 juin, et on atteint une teneur en eau maximale qu'au début du mois d'août ( $0,32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ).

*Sur le témoin*, les mesures n'indiquent aucune variation de l'humidité volumique entre 30 et 100 cm, la pluie a une influence uniquement sur les 20 premiers centimètres.

Le dessèchement s'amorce dès le début du mois de septembre. La baisse de l'humidité concerne alors les 40 premiers centimètres. C'est lorsque l'horizon 30-40 cm atteint des valeurs d'humidité identiques aux horizons sous-jacents, que ces derniers voient alors leur teneur en eau diminuer.

Sur le traitement casiers, les vitesses de dessèchement sont plus lentes, et la baisse maximale n'a lieu réellement qu'à partir du mois d'octobre (tableau 4.8). Cet aménagement a mieux valorisé les pluies du mois de septembre, ce qui a permis au sol de conserver des réserves hydriques à un niveau élevé et sur une période de temps plus longue.

#### 4.3.2.2. Evolution des réserves en eau sous culture de contre-saison.

La figure 4.19 présente l'étude comparée de l'influence des différents aménagements sur l'état des réserves hydriques totales. D'après les résultats précédents nous avons considéré deux réservoirs : le premier se situant entre 0 et 50 cm et l'autre entre 50 et 100 cm.

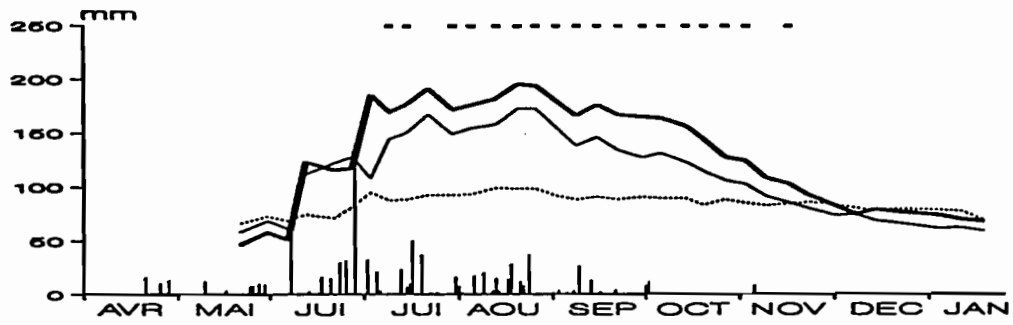
Sur les 50 premiers centimètres, la réserve en eau totale augmente par paliers. Ceci correspond à l'humectation consécutive aux deux épisodes pluvieux du mois de juin. A partir du mois de juillet, la réserve hydrique fluctue autour d'une valeur élevée ; de l'ordre de 180 à 190 mm sur les casiers, et de 150 à 170 mm sur le microcatchment. Le témoin se maintient à un niveau plus bas, de l'ordre de 100 mm. Le réservoir inférieur, de 50 à 100 cm, présente des variations nettement moins importantes, lesquelles ne sont pas directement concomitantes avec les épisodes pluvieux.

	septembre	octobre	novembre	décembre
microcatchment	0,12	0,13	0,16	0,04
casiers	0,06	0,20	0,27	0,09

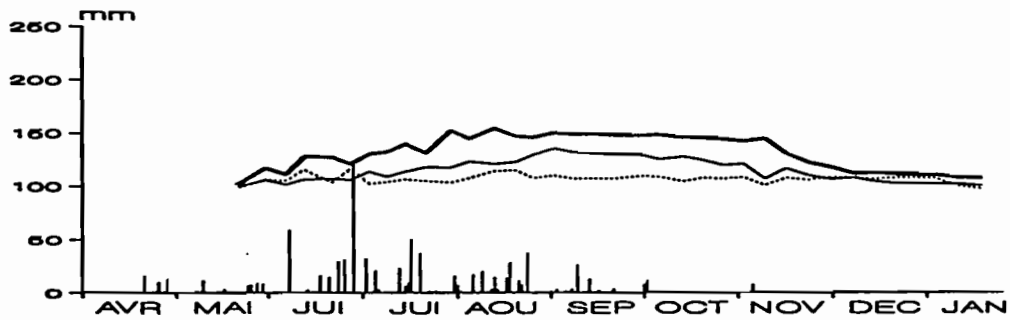
Tableau 4.8 : Vitesse de dessèchement à 40 cm de profondeur ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{jour}$ ) sur vertisol dégradé sous culture de contre-saison.

date	horizon	casiers	microcatchment	témoin	pluie
27/09/89	0-50	164	138 *	87 *	719,1
	0-100	307	240 *	184 *	
02/10/90	0-50	165	128	91	788,1
	0-100	313	257	200	

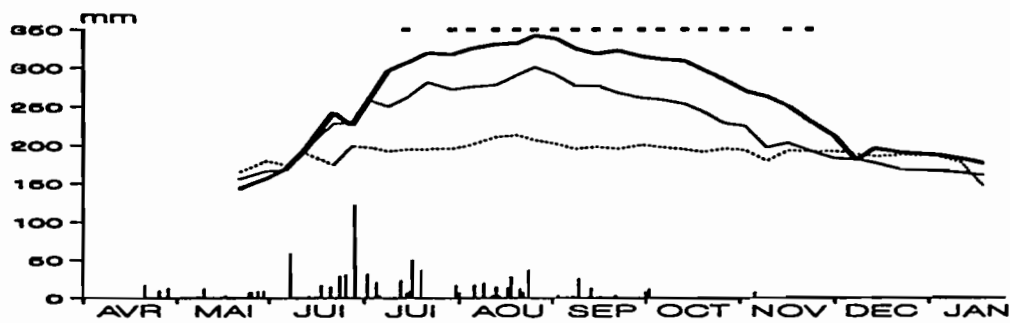
Tableau 4.9 : Réserves en eau totale (mm) en 1989 et 1990 sur vertisols dégradés sous cultures de contre-saison. (\* mesure sur un seul tube d'accès).



tranche de sol 0-50 cm



tranche de sol 50-100 cm



tranche de sol 0-100 cm

Figure 4.19 : Evolution comparée des réserves hydriques totales en 1990, sur les tranches 0-50 cm, 50-100 cm et 0-100 cm, pour les aménagements en casiers (—), microcatchment (---) et témoin (···), sur vertisols dégradés sous culture de contre-saison. La marque (·) indique une différence significative entre les 3 traitements à la date considérée. Les histogrammes représentent les hauteurs précipitées journalières.

Entre 0 et 50 cm, les réserves hydriques sont significativement différentes entre les trois traitements sur une période allant de la 1<sup>ère</sup> décennie de juillet à la 3<sup>ème</sup> décennie du mois de novembre. Pour cette période, les moyennes entre casiers et microcatchment ne sont pas significativement différentes, et la différence entre microcatchment et témoin n'existe plus à partir de la 3<sup>ème</sup> décennie d'octobre.

Sur l'ensemble du profil mesuré, les résultats sont identiques. La réserve en eau totale ne varie pratiquement pas sur le témoin (150 mm). Les maxima atteints sur casier et microcatchment atteignent respectivement 342 et 300 mm, et entre ces traitements, pour la même période que précédemment, les moyennes sont significativement différentes.

Le tableau 4.9 regroupe les données de réserves hydriques totales à la fin du mois de septembre, c'est à dire en fin de saison des pluies et au moment du repiquage du sorgho de contre-saison.

Au 2 octobre 1990, les stocks d'eau sont supérieurs de 81 % entre 0 et 50 cm et de 36 % entre 0 et 100 cm sur les casiers par rapport au témoin. Moins importants sur le microcatchment, les gains atteignent respectivement 40 % et 28,5 %.

Les casiers stockent donc d'avantage d'eau, essentiellement au niveau des 50 premiers centimètres, et sur une période plus longue. A partir de la mi-novembre, les différences de réserves n'apparaissent plus entre les différents aménagements.

#### **4.3.2.3. Comportement agronomique du sorgho de contre-saison.**

Contrairement à la culture de saison des pluies, les données quantitatives utilisables sont restreintes. N'ayant pu contrôler l'action de nombreux prédateurs des cultures, aucun rendement en grains n'a pu être mesuré. En supposant que la prédation sur les graines est identique sur tous les épis, on utilisera pour la comparaison entre les différents traitements les mesures de quantités de matière sèche aérienne produite. Nous avons également suivi la vitesse de croissance des plantes, par mesure de hauteur à plusieurs dates successives.

Les résultats, pour les deux années de suivi, sont consignés dans le tableau 4.10.

Ces données ne permettent pas d'effectuer des analyses statistiques et limitent donc la portée des conclusions.

aménagement	parcelle	matière sèche t/ha		croissance cm/j	
		1989	1990	1989	1990
casiers	1	2,3	1,3	1,9	1,2
	2	1,5	1,3	1,3	1,9
microcatch.	1	1,5	0,4	0,7	0,5
	2	1,1	0,7	0,6	0,6
témoin	1	1,4	0,6	1,0	0,3
	2	1,2	0,4	1,8	0,4

Tableau 4.10 : Quantité de matière sèche produite et vitesse de croissance de la plante pendant la phase de montaison du sorgho de contre-saison (muskwaari) en 1989 et 1990. (les parcelles 1 et 2 correspondent aux 2 répétitions du plan d'expérience).



Par contre, les observations qualitatives sur le terrain ont montré pour les deux années des différences nettes entre, d'une part les casiers, et d'autre part le microcatchment et le témoin. Les résultats consignés dans le tableau 4.10 indiquent une même tendance. La croissance fut non seulement plus importante mais également beaucoup plus homogène sur l'ensemble des parcelles expérimentales aménagées en casiers. De même, la reprise des plants, après repiquage, fut nettement plus difficile sur microcatchment et témoin ; où l'on a relevé des pertes à la reprise de l'ordre de 60 à 90 % de perte, alors que celle-ci se situaient entre 40 et 45 % sur les casiers.

Ces observations, certes insuffisantes, s'accordent avec les résultats de l'étude des réserves hydriques du sol, et montrent donc que l'alimentation en eau de la plante est le principal facteur limitant de la culture du sorgho de contre-saison, comme l'ont affirmé ECKEBIL *et al.* (1972).

#### Enracinement du "muskwaari", sorgho de contre-saison.

Nous avons réalisé un profil racinaire sous une plante bien développée, située sur une parcelle aménagée en casier. L'observation a été réalisée fin janvier 1991, donc au maximum de développement du système racinaire (figure 4.20).

Aucune racine n'apparaît dans l'horizon 0-15 cm. De grosses racines se sont développées à la base du plateau racinaire qui se situe au fond du trou de plantation soit entre 15 et 20 cm. Celles ci prospectent essentiellement l'horizon 20-40 cm. En dessous de 40 cm, les racines, même très fines, sont quasiment absentes. Par contre, nous avons observé, entre 30 et 40 cm de profondeur la présence de racines à développement horizontal sur une distance de plus d'un mètre. Le système racinaire de ce type de sorgho, dans les conditions édapho-hydriques présentes, est donc caractérisé par un développement préférentiel subhorizontal entre 20 et 40 cm, et la prospection racinaire se limite aux horizons peu profonds. Ces résultats rejoignent ceux présentés par GORSOU (1983), qui considère que l'enracinement sous les 50 centimètres de profondeur constitue moins de 5 % de l'enracinement total.

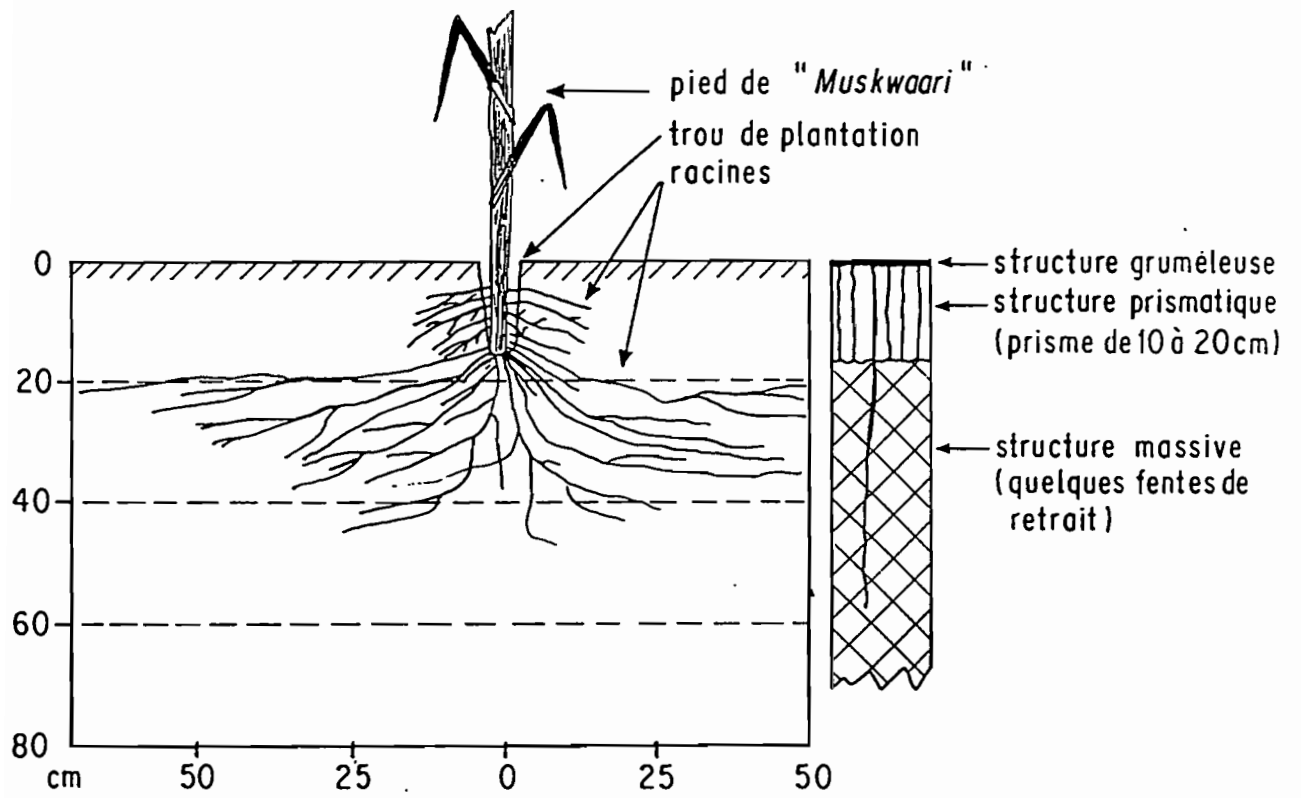


Figure 4.20 : Profils racinaires sous culture de sorgho de contre-saison sur vertisol dégradé avec aménagement en casiers.

#### **4.3.2.4. Evolution des réserves en eau disponible sous culture de contre-saison.**

La figure 4.21 représente l'évolution des réserves hydriques disponibles sous culture de "muskwaari". Seuls les traitements casiers et microcatchment présentent des humidités volumiques supérieures à la teneur en eau au pF 4,2.

Entre 0 et 40 cm de profondeur, on observe, tout au long de la saison, une répartition homogène de la réserve théoriquement disponible. La disponibilité en eau est pratiquement inexistante sous les 40 cm. Ceci pourrait expliquer la concentration à ce niveau de l'enracinement du sorgho de contre-saison.

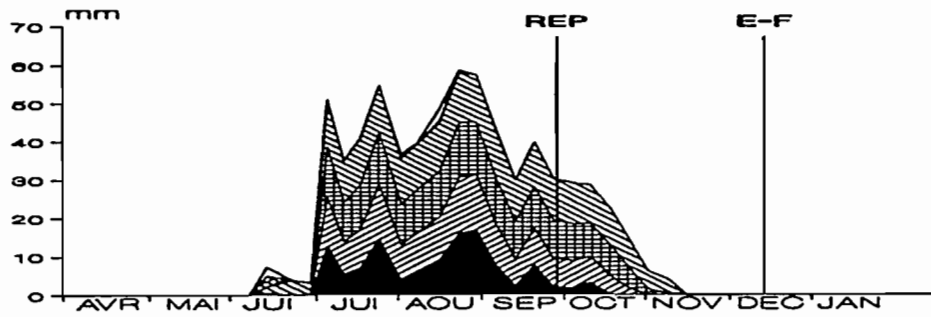
Au moment du repiquage du muskwaari, les réserves disponibles théoriques sont nettement supérieures sur les casiers à celles des autres traitements ; 30 mm entre 0 et 50 cm pour les casiers contre 6 mm sur le microcatchment. Cette disponibilité hydrique pour les plantes se situent essentiellement entre 10 et 40 cm de profondeur. De même, les stocks disponibles sont présents jusqu'au 15 novembre, par contre ils sont nuls dès la 3<sup>ème</sup> décennie d'octobre.

Les réserves en eau disponibles théoriques sont donc inexistantes bien avant la fin du cycle de la plante. La floraison et l'épiaison interviennent au cours de la 1<sup>ère</sup> quinzaine de décembre, phase en général très "consommatrice" d'eau. Ces observations montrent bien que la plante est sûrement capable de puiser de l'eau dans le sol à des pressions moindres que celle habituellement admises c'est à dire à -1,6 MPa.

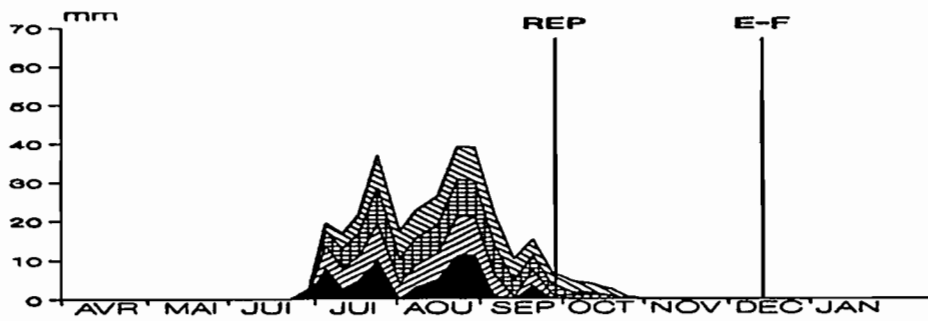
#### **4.3.2.5. Conclusions sur l'efficacité des traitements en cultures de contre-saison.**

Les principaux résultats sont regroupés dans le tableau 4.11. Les casiers améliorent nettement les stocks d'eau disponible sur les vertisols dégradés. De plus, ils ont une action d'homogénéisation des conditions culturales sur la parcelle.

Au moment du repiquage du sorgho de contre-saison, soit en fin de saison des pluies, l'eau théoriquement disponible se situe essentiellement dans la tranche 10-40 cm. L'enracinement se développe donc dans cet horizon et dans une direction subhorizontale. Ceci explique les faibles densités de repiquage pratiquées par les paysans dans ce type de culture, la surface utile



aménagement casiers



aménagement microcatchment

Figure 4.21 : Evolution des réserves hydriques disponibles, en 1990, sur vertisols dégradés sous culture de contre-saison, sur les tranches de sol 0-10 cm ■, 0-20 cm ▨, 0-30 cm ▩, 0-40 cm ▧. REP: date du repiquage du sorgho de contre-saison, E-F date de l'épiaison et de la floraison.

	casiers		micro-catchment		témoin	
	1989	1990	1989	1990	1989	1990
réserves hydriques totales * horizon 0-100 cm	127	137	107	119	100	100
durée de présence réserves hydriques disponibles (mois)	6,19	4,67	5,03	3,74	0	0

\* indice de comparaison par rapport au témoin = base 100

Tableau 4.11 : Comparaison, entre les différents traitements, des réserves hydriques totales et de la durée de la disponibilité en eau (en mois), sur vertisol dégradé cultivé en sorgho de contre-saison. Les indices de comparaison sont calculées à partir des valeurs cumulées de réserves hydriques totales pour les périodes 1989 (15 juin 1989 au 7 mai 1990) et 1990 (22 mai 1990 au 22 janvier 1991).

minimale et nécessaire à une plante étant plus élevée si son enracinement est limité en profondeur.

Le microcatchment demande un entretien constant au cours de la saison des pluies. La concentration de l'eau en un point de la diguette de retenue provoque souvent son écroulement et donc des pertes en eau parfois importantes. Sur les casiers, le carroyage serré limite considérablement les risques de destruction des diguettes ; l'entretien y est nettement moins fastidieux.

Enfin, pour une mise en culture de contre-saison, l'absence de variations des réserves hydriques disponibles sur la parcelle témoin montre bien l'intérêt des aménagements sur les vertisols dégradés.

A partir de ces résultats, nous pouvons ainsi discuter de l'importance de l'amélioration du régime hydrique dans le cadre de la réhabilitation des vertisols dégradés.

#### **4.3.3. Amélioration du régime hydrique et la réhabilitation des vertisols dégradés.**

Le seul suivi de l'évolution de l'humidité volumique ne permet pas de comprendre totalement le fonctionnement hydrique des vertisols dégradés. Nous pouvons malgré tout émettre quelques hypothèses à partir de nos résultats, et des travaux de nombreux auteurs sur le régime hydrique des vertisols (STIRK, 1954 ; JAILLARD et CABIDOCHÉ, 1984) ou des sols argileux (BLAKE *et al.*, 1973 ; BOUMA *et al.*, 1978 ; HOOGMOED et BOUMA, 1980). Tous ont noté l'extrême importance de la macroporosité fissurale sur le régime hydrique des vertisols. Grâce à une circulation de l'eau préférentielle à travers les fentes de retrait, l'humectation des horizons profonds est rapide, BOUMA *et al.* (1978) emploient le terme de *court circuit*. La profondeur d'humectation est fonction de la profondeur de la fissuration, et celle ci délimite donc verticalement, en sol non saturé, deux compartiments à conductivité hydraulique différente. Sur les vertisols dégradés de Mouda, des différences apparaissent entre les traitements. Après la pluie du 9 juin, les parcelles buttées, aménagées en casiers, et à degré moindre les parcelles aménagées en microcatchment, présentent une augmentation des teneurs en eau à 70 cm de profondeur. On peut considérer et on le vérifie sur les profils pédologiques qu'avec ces traitements, le réseau fissural atteint ce niveau en fin de saison sèche. Après la pluie très intense du 28 juin, les teneurs en eau ont de nouveau progressé mais uniquement

entre 30 et 40 cm de profondeur. A cette date donc, le réseau fissural demeure encore très conducteur, par contre à 70 cm la fermeture des fentes par gonflement a eu lieu et la conductivité hydraulique de cet horizon a considérablement diminué. Sur les autres parcelles avec labour seul et témoin, la limite du réseau fissural en fin de saison sèche se situe plutôt au niveau des 50 cm.

Après les premiers épisodes pluvieux importants, la saturation du profil est atteinte, et le régime hydrique se caractérise, en dessous de 25 à 30 cm de profondeur alors par une relative inertie au niveau des variations d'humidité volumique. Seuls les horizons superficiels (0 à 20 cm) présentent alors des alternances d'humectation et de dessiccation en liaison avec la pluviosité. Par contre entre 30 et 50 cm, l'humidité demeure relativement constante. Sur certains traitements, les teneurs en eau, entre 70 et 100 cm de profondeur, augmentent de façon très lente et progressive jusqu'à un maximum. C'est ce que l'on observe sur les parcelles buttées et les parcelles aménagées en casiers.

*Des questions se posent alors : d'où provient l'eau qui participe à l'humectation de ces sols en profondeur? pourquoi est-elle uniquement présente sur certains traitements?*

*L'apport peut être continu à partir des horizons supérieurs tout au long de la saison des pluies. Ce flux répond alors aux modèles de circulation de l'eau définies à partir de l'extension des lois de DARCY (HILLEL, 1974), en considérant que les fentes de retrait ne constituent plus des passages préférentiels de l'eau. Les quantités d'eau stockées en profondeur seraient alors fonction de la pluviosité et des termes du bilan hydrique, notamment du ruissellement. Les aménagements qui limitent les écoulement de surface permettent alors une infiltration plus conséquente, et donc un stockage accru, il y a augmentation de la charge hydraulique sous casiers. Cependant, de nombreux auteurs ont noté l'extrême faiblesse des conductivités hydrauliques des vertisols en condition saturée, de l'ordre du centimètre par jour. Sur des essais d'irrigation gravitaire de vertisols au Kenya et au Soudan, SMEDEMA (1984) montre que l'infiltration de l'eau est pratiquement nulle dès que le sol est saturé. A Mouda, THEBE (1987) donne des coefficients moyens de ruissellement de l'ordre de 45 à 50 % sur vertisols dégradés, et alors que ceux-ci atteignent jusqu'à 90 % en conditions de saturation.*

*L'augmentation des teneurs en eau en profondeur peut également provenir d'une redistribution de l'eau emmagasinée dans le*

*réseau fissural au cours des premiers épisodes pluvieux.* L'humectation vers des zones, adjacentes à ce réseau, et de perméabilité beaucoup plus faible, est alors très lente (BOUMA *et al.*, 1979). La figure 4.22 établit l'existence d'une relation entre la variation de la réserve hydrique entre 0 et 70 cm avant et après les épisodes pluvieux du mois de juin, et le maximum de l'humidité atteinte à 70 cm au cours de la saison. La corrélation est certes faible mais significative au risque d'erreur de 5 %. Le stockage en profondeur, caractérisé par des teneurs en eau élevées, serait donc fonction de l'efficacité des premières pluies de la saison, au moment où le réseau fissural est encore largement conducteur. Selon HOOGMOED et BOUMA (1980), le flux hydrique à travers un sol argileux non saturé est fonction de l'intensité et la durée des pluies. Les aménagements de surface favoriseront d'autant plus l'infiltration dans le réseau fissural, qu'ils accentueront la charge hydraulique au niveau de celui-ci. Ceci explique l'efficacité nettement meilleure des casiers, où tout ruissellement est stoppé. On a alors une charge hydraulique accentuée dans la macroporosité fissurale. Par contre, le labour, qui améliore le coefficient d'infiltration, ne donne pas, par rapport au témoin, de différence aussi significative. La charge hydraulique dans le réseau fissural est insuffisante pour obtenir un stockage important après une pluie.

Cependant cette hypothèse ne peut expliquer le fonctionnement hydrique observé sur les parcelles buttées. Le buttage est, en effet, réalisé un mois après le semis du sorgho de saison des pluies. Le stockage en eau n'est pas, dans les 50 premiers centimètres, significativement différents des autres traitements qui correspondent aux parcelles avec labour seul et témoin. Par contre les teneurs en eau augmentent à 70 et 90 cm de profondeur, avant la réalisation du buttage. Le régime hydrique des vertisols semble donc relativement complexe, complexité liée au caractère anisotrope de ce milieu. Les mesures d'humidité volumique ne sont pas suffisantes pour expliciter au mieux le fonctionnement hydrique des vertisols dégradés et il serait nécessaire d'avoir également des mesures concernant l'état dynamique de l'eau dans le sol.

Néanmoins, le réseau fissural joue un rôle important pour le stockage de l'eau dans ces sols, et la disparition de cette macroporosité par dégradation diminue les réserves hydriques disponibles. *La réhabilitation passe donc nécessairement par un maintien voire un accroissement du réseau fissural.*



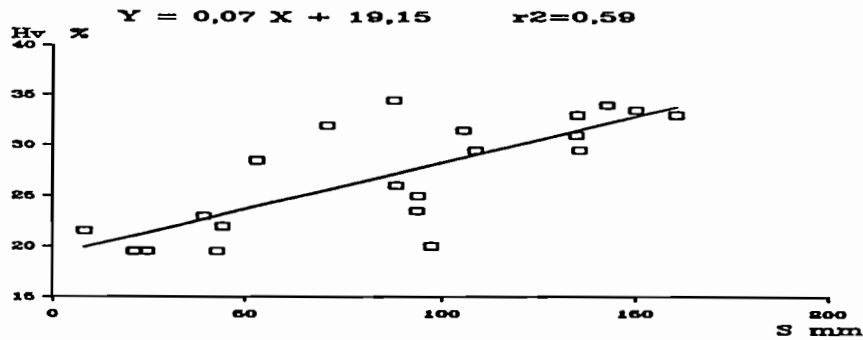


Figure 4.22 : Relation entre la variation des réserves hydriques totales sur 0-70 cm entre le 7 juin et le 4 juillet 1990, et l'humidité volumique maximale atteinte en 1990 à 70 cm de profondeur, sur l'ensemble des traitements de l'expérimentation, chaque point représente les mesures sur un tube d'accès.

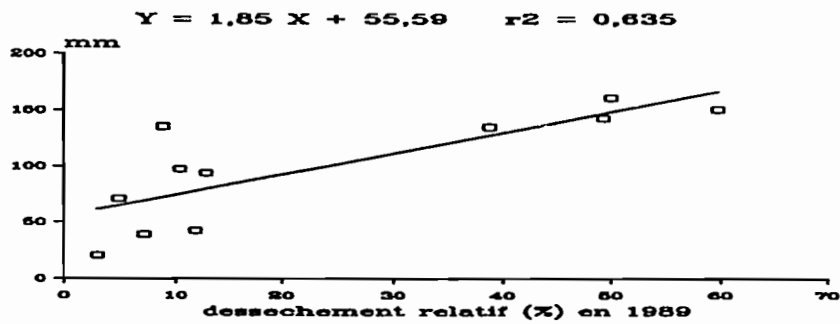


Figure 4.23 : Relation entre le dessèchement relatif à 70 cm de profondeur en 1989, et la variation de stock hydrique sur la tranche 0-70 cm au cours de la saison pluvieuse suivante 1990, pour l'ensemble des traitements de l'expérimentation. Chaque point correspond aux mesures sur un tube d'accès.

Les mouvements mécaniques des sols, responsables de la macroporosité fissurale (retrait et gonflement), sont liés à l'alternance d'humectation et de dessiccation de ces sols. La figure 4.23 présente le rapport entre le dessèchement relatif à 70 cm de profondeur et la variation maximale de réserve hydrique pendant la saison des pluies 1990. Le dessèchement relatif correspond à la variation entre les humidités volumiques maximales et minimales par rapport à l'humidité maximale, au cours de la saison 1989. Une relation existe ( $r^2 = 0,63$ ) et indiquerait l'importance de l'ampleur de la variation des teneurs en eau sur la dynamique de stockage hydrique dans le sol au cours de l'année suivante. Ceci est en partie confirmé par la présence accrue de fentes de retrait sur les parcelles aménagées en casiers, traitement qui a donné les réserves hydriques maximales en 1989 et 1990. De même, ce phénomène explique l'amorce de l'humectation en profondeur sur les parcelles buttées, avant la mise en place de l'aménagement. L'humectation sous les 50 premiers centimètres est, par conséquent, en relation étroite avec le comportement hydrique au cours de la saison des pluies précédente.

Les résultats tendent à montrer que les vertisols nécessitent, pour maintenir en état leur fonctionnement hydrique, la présence d'un modelé de surface suffisant, tel que les casiers ou le buttage. Notons que ce rôle peut être assimilé à celui joué par le relief gilgaï, dont l'importance sur le régime hydrique est soulignée par JAILLARD et CABIDOCHÉ (1984). Un simple labour par contre n'est pas suffisant pour créer des concentrations en eau en un point donné de la surface du sol, nécessaire pour favoriser l'infiltration.

#### **4.4. CONCLUSIONS SUR L'AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES SOLS DE LA SERIE VERTISOLIQUE DU BASSIN VERSANT DE MOUDA.**

Les expérimentations sur l'amélioration du régime hydrique des sols de la série vertisolique, du bassin versant de Mouda, ont montré l'importance de la nature originelle du matériau. Le fonctionnement hydrique des vertisols est fortement conditionné par la présence ou l'absence d'une macroporosité fissurale. En dehors de celle ci, les circulations de l'eau sont très difficiles, ce qui limite les quantités d'eau disponible pour les plantes.

Sur les sols de type "hardé", les aménagements testés ne provoquent pas de fortes modifications du régime hydrique. La destruction de la croûte de surface par un travail du sol associée à une diguette de retenue du ruissellement de surface offre les meilleurs résultats. L'indicateur principal est l'augmentation de la profondeur d'humectation jusqu'à 40 cm, contre 10 à 20 cm sur la parcelle témoin.

Sur les vertisols dégradés, la constitution de réserves hydriques est en étroite liaison avec les quantités d'eau infiltrées pendant les premiers épisodes pluvieux de la saison des pluies. Les aménagements qui augmentent l'efficacité des pluies à cette époque donnent les meilleurs résultats sur le plan hydrique, c'est notamment le cas des casiers. Ceux-ci maintiennent les stocks hydriques à un niveau élevé pendant la saison des pluies, et favorisent ainsi la réussite d'une culture de contre-saison. Par contre, les traitements, qui stoppent tout ruissellement, mais qui limitent également le drainage externe, comme le buttage, sont préjudiciables pour une culture de sorgho de saison des pluies.

Le tableau 4.12 résume, sous forme de calendrier des réserves hydriques disponibles, l'efficacité des différents types d'aménagements sur les vertisols dégradés et les sols "hardés".

Cette analyse est issue de deux années d'observations, et ne peut être par conséquent que partielle, étant donné notamment la variabilité climatique observée sous ces climats. Il apparaît donc intéressant d'avoir un outil prospectif, applicable à une étude sur la modification du régime hydrique des sols par divers paramètres. Nous allons donc voir dans quelle mesure une modélisation du bilan hydrique des vertisols peut nous aider à répondre à certaines questions.

SOL	TRAITEMENTS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	JANV	FEVR	MARS
VERTIGES	BLOCS casiers												
	microcatchment *												
	témoins												
LALSDS	labour+buttage												
	labour												
	témoins												
HARDES	bandes alternées *												
	microcatchment *												
	pitting												
	témoins												

\* mesure sur la bande labourée réceptrice du ruissellement.  
 BLOC CS: Bloc de culture de Contre-saison.  
 BLOC SP: Bloc de culture de saison des pluies.

Réserves hydriques disponibles sur 0-50 cm.

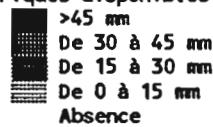


Tableau 4.12 : Calendrier des réserves hydriques théoriquement disponibles sur l'horizon 0-50 cm sur vertisols dégradés et sols "hardés" pour les différents aménagements en 1990 (l'humidité théoriquement disponible correspond à l'humidité volumique supérieure à celle mesurée à pF 4,2 pour un horizon donné).

**CHAPITRE V.**

**MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE  
DES VERTISOLS DEGRADES.**

L'étude de l'amélioration du régime hydrique des sols, appartenant à la série des vertisols dégradés a été réalisée à partir de deux années d'observations. Certains aménagements n'ont pas donné les résultats escomptés. C'est le cas, notamment, pour le traitement microcatchment.

La modélisation du régime hydrique et la simulation de différentes conditions peut aider à déterminer l'efficience de divers aménagements devant assurer une meilleure gestion de l'eau. Avant d'aborder cette perspective, il nous faut définir et établir un modèle de fonctionnement hydrique sur la base de nos connaissances sur les vertisols dégradés.

## **5.1. PRINCIPE DE LA MODELISATION ; EQUATION DU BILAN HYDRIQUE.**

Le modèle de bilan hydrique, que nous tenterons d'établir, est de type déterministe. Développé initialement par FRANQUIN et FOREST (1977), ce modèle a l'avantage de fonctionner à partir de données agro-climatologiques facilement mesurables (ALBERGEL *et al.*, 1991).

### **5.1.1. Equation du bilan hydrique.**

Le principe est basé sur la comptabilisation des gains et pertes en eau d'un système eau-sol-plante, représentée par l'équation 1, et définie auparavant au chapitre IV.

$$\Delta S = P - R - D - ETR \quad (1)$$

$\Delta S$  représente la variation de réserve hydrique totale au niveau d'un réservoir sol considéré.

**P** constitue l'apport en eau par les précipitations.

Les pertes en eau sont constituées par ; **R** le ruissellement à la surface du sol, **D** le drainage au delà des limites du réservoir considéré et **ETR** l'évapotranspiration réelle.

Ces différents termes du bilan hydrique sont établis pour une période de temps donnée.

### **5.1.2. Mesure et estimation des termes du bilan hydrique.**

Dans le cadre de notre étude, la finalité de la modélisation est de simuler les modifications des réserves en eau du sol en fonction notamment de la pluviosité. Il importe donc ici d'estimer les termes de ruissellement, de drainage et d'évapotranspiration réelle à partir de données connues ou facilement mesurables.

#### **5.1.2.1. Ruissellement et drainage.**

Les équations 2 et 3 représentent les fonctions de production du ruissellement sur les vertisols dégradés et les sols "hardés" du bassin versant de Mouda. Elles ont été établies sous pluies naturelles (THEBE, 1987 ; THEBE et PONTANIER, 1989).

Vertisols dégradés  $R = 0,541 P - 0,103 CV + 0,075$  (2)

Sols "hardés"  $R = 0,838 P - 2,34$  (3)

Le ruissellement **R**(mm) est donc estimé en fonction de la pluviosité **P**(mm) et d'un indice de couverture végétale **CV**(%).

Sous végétation naturelle, et pour le vertisol dégradé, SEINY BOUKAR (1990) estime le couvert végétal à 10 % jusqu'au 10 juillet et entre 30 et 50 % jusqu'au 10 septembre. Pour une culture de saison des pluies telle que le sorgho, nous adopterons les valeurs suivantes, évaluées d'après nos observations ; 10 % du 10 au 30 juillet, 50 % du 1 au 30 août, et 80 % du 1 au septembre au 15 octobre.

Aucune caractérisation de flux hydrique nous permet d'évaluer le drainage de l'eau en profondeur. Cependant, nous avons vu précédemment que les teneurs en eau à 90 cm de profondeur n'évoluent pratiquement pas sur un vertisol cultivé traditionnellement. SEINY BOUKAR (1990) obtient les mêmes résultats

sous jachères de vertisol dégradé. On peut donc considérer que les pertes par drainage, au delà de un mètre de profondeur, sont négligeables. Nous limiterons donc la tranche de sol, objet de la modélisation des réserves hydriques, aux cent premiers centimètres, sans distinction d'horizons à l'intérieur de ce réservoir, ce qui nous affranchit du terme de drainage dans l'élaboration du bilan hydrique.

#### 5.1.2.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle.

L'évapotranspiration réelle ETR représente les pertes en eau dues à l'évaporation directe à partir du sol et à la transpiration des végétaux. L'ETR est généralement comparée à l'évapotranspiration potentielle ETP, définie par la consommation en eau d'un couvert végétal continu, couvrant bien le sol, et qui maintient sa transpiration grâce à une alimentation hydrique convenable (RIOU, 1980). L'ETP, selon DANCETTE (1983), représente la demande évaporative, qui traduit l'influence de l'ensemble des facteurs climatiques sur les pertes en eau par évapotranspiration d'une surface donnée.

Il est admis, à l'heure actuelle, que la formule de PENMAN, basée sur les propriétés physiques de l'air environnant une surface évaporante, est la plus appropriée pour les calculs d'ETP (DANCETTE, 1991). Le problème consiste donc à préciser les relations existantes entre ETR et ETP.

L'estimation de l'ETR peut être réalisée à partir de l'équation du bilan hydrique. La figure 5.1 donne les valeurs d'ETR calculées en 1989 sur les parcelles cultivées en sorgho de saison des pluies et celles aménagées en casiers pour une culture de contre-saison. Nous avons tenu compte pour cela des variations de stock sur les 100 premiers centimètres de profondeur, ainsi que des valeurs de ruissellement calculées à partir des fonctions de production précédemment citées. Nous avons par ailleurs considéré des pertes par drainage négligeables. L'ETP est calculée selon la formule de PENMAN, rapportée par GOMMES (1983).

Sur la période de mesure considérée, aucune relation évidente n'apparaît entre l'ETR calculée et l'ETP. Cependant, nous remarquerons que le maximum de l'ETR est atteint au cours de la saison des pluies, et que celle-ci devient pratiquement nulle par contre pendant la saison sèche. Les valeurs maximales atteintes sont très élevées de 4 à 11 mm/j en saison pluvieuse ; elles sont supérieures à la demande évaporative caractérisée par l'ETP, qui est de l'ordre de 4 mm/j. Une phase intermédiaire se présente après l'arrêt des pluies,



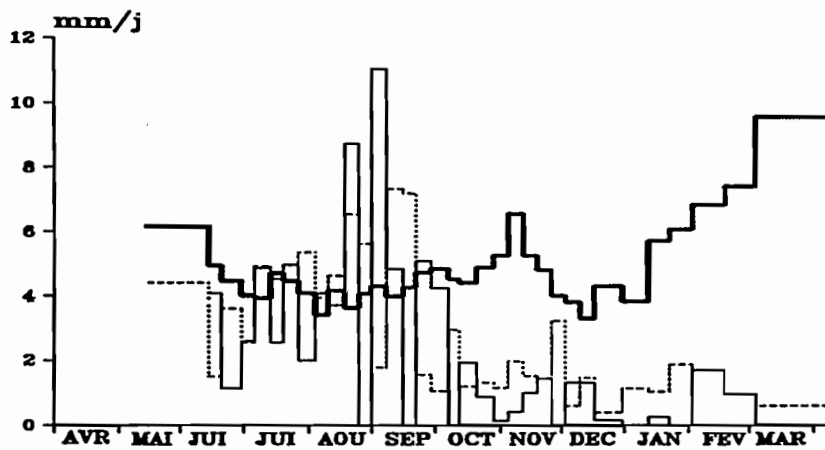


Figure 5.1 : EvapoTranspiration Réelle sur une parcelle cultivée en sorgho de saison des pluies (—) et sur une parcelle cultivée en sorgho de contre-saison aménagée en casiers (· · ·), calculée à partir de l'équation du bilan hydrique. La courbe (—) représente l'EvapoTranspiration Potentielle calculée d'après la formule de PENMAN. Saison 1989-1990.

avec des ETR moyennes qui restent élevées mais deviennent inférieures à l'ETP.

Ces observations rejoignent les calculs effectués par SEINY BOUKAR (1990) sur les mêmes types de sol. De même GARDNER *et al.* (1987) considèrent que les pertes en eau par évapotranspiration sur un vertisol proche de la saturation hydrique sont équivalentes à la pluviosité. Les propriétés physiques de ces sols sont susceptibles d'induire des engorgements hydriques importants en saison des pluies, aussi la surface évaporante d'un vertisol peut alors être assimilée aux caractéristiques d'une surface évaporante d'eau libre, ce qui expliquerait les quantités d'eau élevées perdues par évapotranspiration.

Par contre, l'absence, en saison sèche, de végétation et de réserves disponibles dans le sol limitent considérablement les pertes par évaporation, alors que la demande évaporative demeure très élevée.

L'évapotranspiration réelle est donc d'une intensité très spécifique suivant la période de l'année. Il convient donc de la considérer en fonction des différentes phases de l'évolution des réserves hydriques du sol et de l'état de la végétation et des cultures.

## **5.2. MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE.**

La modélisation envisagée du bilan hydrique revêt un caractère empirique. Il est donc nécessaire dans ce cas d'émettre des hypothèses sur le fonctionnement hydrique des vertisols dégradés. Celles ci sont basées sur nos travaux présentés auparavant (chapitre IV), ainsi que sur les observations de SEINY BOUKAR (1990), et celles des nombreux auteurs déjà cités qui ont été confrontés au problème du régime hydrique des vertisols.

### **5.2.1. Schéma hypothétique du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés.**

A partir du début de la saison des pluies, nous pouvons considérer quatre phases dans l'évolution des réserves hydriques.

- *une phase d'humectation du profil* : les hauteurs de pluie, qui ont échappées au ruissellement, présentent une pleine

efficacité dans la recharge hydrique du profil, à travers la macroporosité fissurale. Le sol est nu, et l'évaporation directe à partir du sol est très faible voire nulle ;

- *une phase de saturation hydrique* : le gonflement des argiles provoque une fermeture de la macroporosité, l'infiltration de l'eau est alors très lente. Les pertes par évaporation, à partir de stagnations d'eau libre, sont très importantes, proche de la demande évaporative ;
- *une phase de dessèchement* : elle débute avec le ralentissement de la fréquence des pluies puis l'arrêt total des précipitations. L'évapotranspiration réelle diminue fortement en fonction de la diminution des réserves hydriques disponibles dans le sol ;
- *une phase de dessèchement total* : la végétation est absente et les réserves en eau disponibles inexistantes, l'évapotranspiration réelle est donc très faible voire négligeable.

Dans ce schéma apparaissent deux seuils limitant les différentes phases. Le premier,  $L_{hs}$ , correspond à une limite entre la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique, qui peut donc être atteinte lorsque la quantité d'eau présente dans le sol est nécessaire et suffisante pour provoquer la fermeture du réseau fissural. Le second,  $L_{sd}$ , correspondant au début de la phase de dessèchement, est fonction du ralentissement des pluies, la limite peut être caractérisée par une pluviosité minimale pendant la période de simulation considérée.

### **5.2.2. Estimation des différents paramètres nécessaires à la modélisation.**

Les différents paramètres, définis au paragraphe précédent, peuvent être évalués par ajustement successif, en comparant les valeurs de stock estimé par le modèle et celles mesurées sur le terrain. Toutefois DE WIT (1970 in LASCANO, 1991) met en garde contre les excès de cette méthode, considérant alors que le modèle est non plus explicatif mais démonstratif. C'est pour cela que nous avons estimé des valeurs de seuils et de paramètres simplifiés, qui correspondent aux observations générales effectuées.

Nous considérons donc que :

- la limite Lhs est atteinte lorsque la réserve hydrique totale s'est accrue de 80 % par rapport à la réserve hydrique du début de saison des pluies ;
- la limite Lsd correspond à des précipitations inférieures à 20 mm au cours des 2 décades successives ;
- ETR négligeable pendant la phase d'humectation en raison de l'infiltration par les fissures, devient égale à l'ETP Penman pendant la phase de saturation hydrique.

Pour la phase de dessèchement du profil, l'observation de l'évolution des réserves hydriques totales indique que la baisse des teneurs en eau suit une loi exponentielle. Nous avons donc estimé l'ETR, unique perte en eau pendant cette phase, à partir d'une loi, dont les principaux facteurs sont la demande évaporative et les réserves en eau du sol, cette loi est traduite par l'équation 4.

$$\text{ETR} = \text{ETP} [ 1 - e^{\alpha(\text{So} - \text{Si})} ] \quad (4)$$

ETR et ETP sont calculées respectivement sur la période allant du jour  $i$  au jour  $i+1$ .  $\text{Si}$  est la réserve hydrique totale au jour  $i$ ,  $\text{So}$  est la réserve hydrique totale minimale obtenue sur 0-100 cm pendant la saison sèche, que nous estimerons à 140 mm pour la suite de notre étude. Le coefficient  $\alpha$ , estimé par ajustements successifs à partir des données mesurées, se différencie pour les deux types de cultures. On a pour le sorgho de saison des pluies et le sorgho de contre-saison adopté les valeurs respectives suivantes : 0,0025 et 0,0035.

La figure 5.2 résume le schéma hypothétique du fonctionnement hydrique des vertisols, sur lequel est basé la modélisation.

### 5.2.3. Simulation de l'évolution des réserves hydriques et ajustement du modèle.

Nous avons fait une application du modèle en utilisant les données climatiques des deux années d'expérimentations, qui inclue les deux saisons des pluies de 1989 et 1990.

L'unité de temps utilisée est la décade. Elle correspond au pas de temps des mesures effectuées sur le terrain. De plus, la plupart des données climatiques moyennes sont plus facilement disponibles en cumul décadaire.

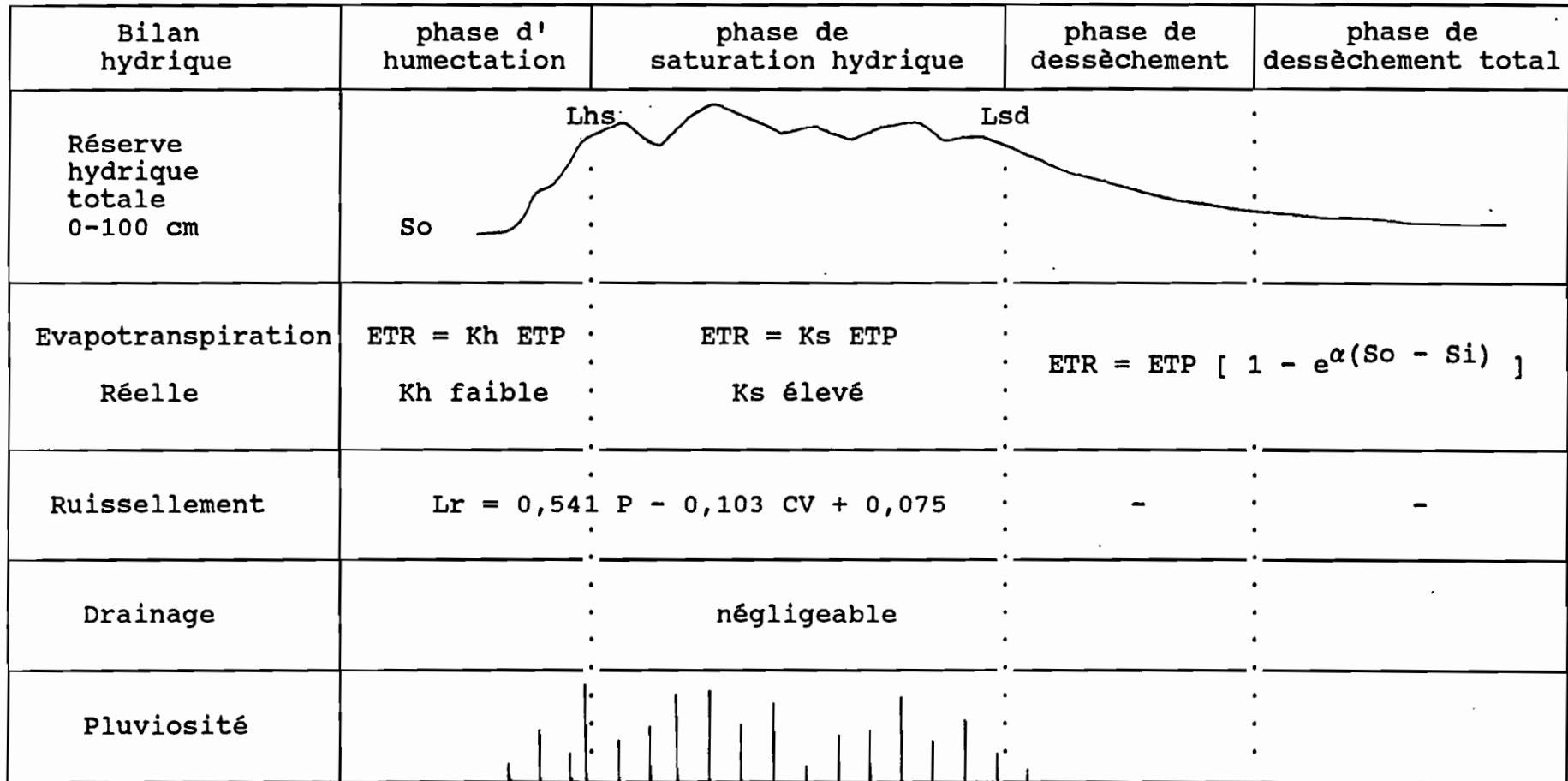


Figure 5.2 : Description du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés, et évolution des différents termes du bilan hydrique au cours du temps.

Lhs : Seuil limite entre la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique Lsd : Seuil limite entre la phase de saturation hydrique et la phase de dessèchement So : Réserve hydrique totale en fin de saison sèche Si : Réserve hydrique totale au jour i Lr : Lamme ruisselée en mm P : Hauteurs précipitées en mm CV : indice de couvert végétal

### **5.2.3.1. Simulation pour une culture traditionnelle de sorgho de saison des pluies.**

La figure 5.3 représente d'une part la courbe d'évolution des réserves hydriques calculées par le modèle et, d'autre part, les points mesurés sur la parcelle cultivée en 1989 en sorgho de saison des pluies sans aucun aménagement spécifique, ce qui correspond à la parcelle témoin de l'expérimentation.

Au vue de la représentation graphique, le modèle semble rendre compte correctement de l'évolution des réserves hydriques totales des vertisols cultivés au cours de la saison pluvieuse 1989.

Cependant, le modèle fait apparaître une sous estimation au cours du mois de juillet, liée certainement à la surestimation des pertes en eau. Le développement du sorgho est encore limité pendant cette période, l'évapotranspiration serait donc moins élevée. Il apparaît donc nécessaire de connaître plus précisément la consommation en eau du sorgho au cours des différentes phases du cycle de croissance.

### **5.2.3.2. Simulation pour une culture de sorgho de contre saison avec aménagement en casiers en 1989.**

Les casiers ont pour rôle d'empêcher tout ruissellement, et de forcer l'eau à s'infiltrer, sauf débordement, hypothèse bien improbable avec des diguettes de 20 à 25 cm de hauteur soit un réservoir de 200 à 250 mm d'eau. A partir des paramètres précédemment définis, nous avons donc simulé le traitement en casiers en annulant le ruissellement. La figure 5.4 représente les résultats obtenus, comparés aux réserves hydriques mesurées en 1989.

Nous remarquons que nos valeurs estimées sont proches des valeurs mesurées en début de saison des pluies. Par contre, le modèle surestime à partir du mois d'août les réserves en eau du sol. Il semble donc que des pertes en eau ne soient pas suffisamment prises en compte. Si l'on considère que le ruissellement a réellement été maîtrisé sur le terrain, ces pertes seraient les conséquences d'un accroissement des autres termes du bilan hydrique, à savoir l'évapotranspiration et le drainage en profondeur.

L'évapotranspiration réelle, considérée équivalente à la demande évaporative calculée selon PENMAN, est déjà très élevée ; elle peut cependant être sous-estimée. En saison des pluies, aucune culture n'est effectuée. De plus, les diguettes limitent considérablement le

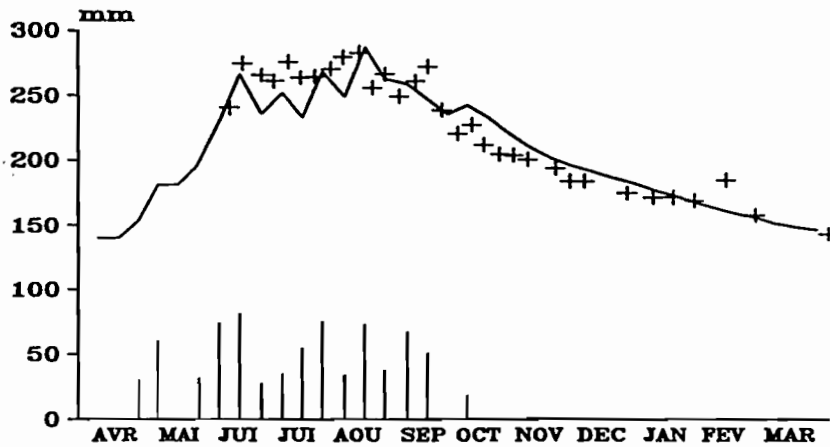


Figure 5.3 : Estimation de l'évolution des réserves en eau du sol sur 0-100 cm (—), sur un vertisol dégradé, cultivé en sorgho de saison des pluies sans aménagement, au cours de la saison 1989-1990. Les points (+) représentent les valeurs mesurées sur le terrain.

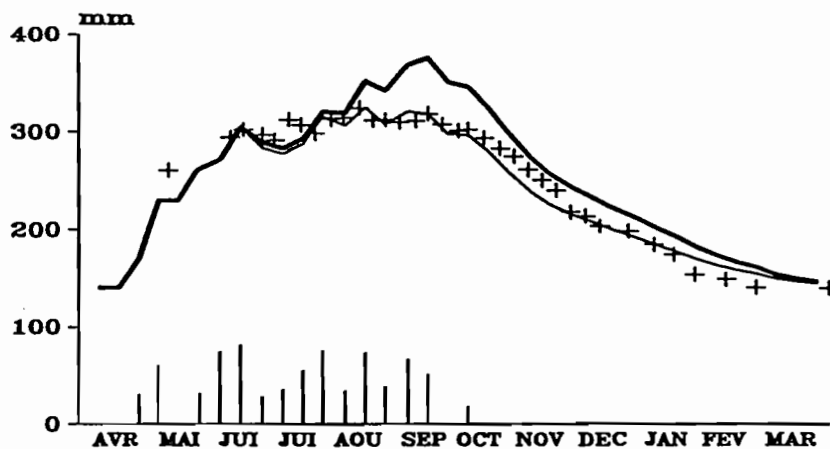


Figure 5.4 : Estimation de l'évolution des réserves hydriques en 1989, de l'horizon 0-100 cm, sur vertisol dégradé aménagé en casiers (—). Les points (+) représentent les valeurs mesurées. La courbe (—) considère des pertes supplémentaires de 20 % sur la pluviosité à partir d'une réserve hydrique atteinte de 300 mm.

drainage externe de ces sols et les excès d'eau induits ralentissent la croissance de la végétation naturelle. La part des pertes par transpiration des plantes devrait donc diminuer. Par contre l'évaporation directe à partir de flaques d'eau libre est certainement nettement plus élevée, par rapport à un sol cultivé en saison pluvieuse.

L'autre hypothèse remise en cause concerne l'existence d'un drainage vertical en dessous de 100 cm de profondeur. Les mesures effectuées montrent une légère augmentation des teneurs en eau à 90 cm de profondeur sur les parcelles aménagées en casiers (chapitre III). Par ailleurs, JAGGI *et al.* (1977) ont mesuré en Inde des flux hydriques indiquant un drainage en dessous de 90 et 110 cm, dans un vertisol laissé en jachère. Il est donc possible que de l'eau soit perdue par drainage pour le réservoir compris entre 0 et 100 cm, les quantités perdues seraient fonction de l'état de saturation du profil dans cet horizon.

Arbitrairement, nous avons ajouté des pertes hydriques correspondant à 20 % de la pluviosité, au dessus d'un seuil de 300 mm de réserve en eau pour le réservoir compris entre 0 et 100 cm. Le résultat est présenté sur la figure 5.4. L'estimation est de nouveau extrêmement proche des valeurs mesurées.

Notons enfin que les coefficients, reliant ETR et ETP Penman, appliqués au modèle pendant la phase de saturation, sont analogues pour les deux cas précédemment simulés ; culture de sorgho de saison des pluies et culture de sorgho de contre saison. Ceci tend à prouver que, sur les vertisols, les pertes par évapotranspiration sont très liées à l'évaporation directe à partir du sol, la végétation par sa transpiration pourrait donc ne pas jouer un rôle majeur dans le bilan hydrique, au cours de la saison des pluies.

#### **5.2.3.3. Simulation sur les données climatiques de la saison 1990-1991.**

La simulation sur deux traitements différents nous a permis d'émettre de nouvelles hypothèses sur le fonctionnement hydrique des vertisols dégradés. Les résultats liés à l'application de ces modèles dans les conditions de la saison 1990-1991 sont présentés sur les figures 5.5 et 5.6, respectivement pour une culture traditionnelle de sorgho de saison des pluies et une culture de sorgho de contre saison.



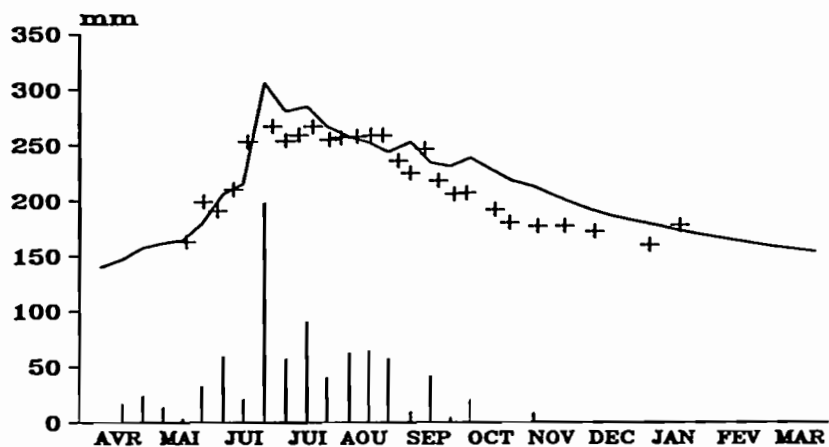


Figure 5.5 : Estimation de l'évolution des réserves hydriques de 0-100 cm à partir des données climatiques de 1990 (—), sur un vertisol dégradé cultivé en sorgho de saison des pluies. Les points (+) correspondent aux valeurs mesurées en 1990.

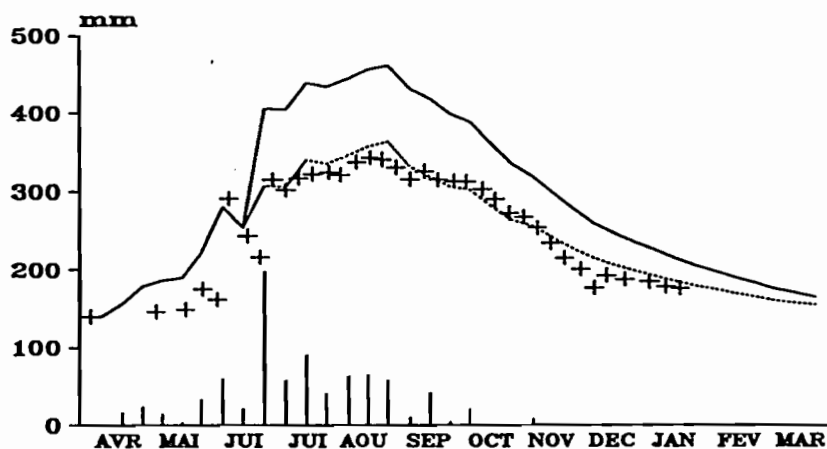


Figure 5.6 : Estimation de l'évolution des réserves hydriques de 0-100 cm à partir des données climatiques de 1990, sur un vertisol dégradé aménagé en casiers et cultivé en sorgho de contre-saison (—). La courbe (· · ·) représente la même simulation en considérant une pluviosité diminuée de 50 % au cours de la 3<sup>ème</sup> décennie de juin. Les points (+) représentent les valeurs mesurées en 1990.

La simulation révèle dans les deux cas la dérive du modèle en présence d'une décade très pluvieuse. Ceci est très net sur les casiers au cours de la 3<sup>ème</sup> décade de juin qui présente une pluviosité très élevée, qui atteint 197 mm, dont 120 mm en une seule averse (figure 5.6).

L'intensité de cette pluie a pu provoquer des pertes par ruissellement à la suite d'un éventuel débordement au-delà des diguettes, dont la hauteur ne dépassait pas 15 à 20 cm. Si on simule une baisse de 50 % de la hauteur précipitée de cet épisode, les réserves hydriques estimées se situent alors dans l'ordre de grandeur des valeurs observées. L'efficacité d'une pluviosité décadaire de 197 mm serait donc limitée à 50%. Pour une simulation dans les conditions d'une culture traditionnelle du sorgho de saison des pluies, où le ruissellement pris en compte est effectivement de l'ordre de 50%, selon la fonction de production de ruissellement de THEBE, le modèle ne présente pas de dérive excessive sur l'évolution des réserves hydriques (figure 5.5).

Mais, dans le cas des casiers avec des diguettes de 25 cm, on peut difficilement admettre un ruissellement qui atteindrait 50 % pour une pluviosité décadaire de 197 mm. Une évaporation intense doit être envisagée. En effet, des évaporations bac de l'ordre de 10 à 15 mm/j sont possibles à cette période. La stagnation d'eau libre sur les casiers, observée pendant trois jours, provoquerait donc des pertes pouvant s'élever de 30 à 45 mm, et constituerait alors des pertes relativement considérables uniquement par évaporation directe. Il faut également ajouter quelques pertes qui seraient dues à une infiltration en profondeur sous l'effet d'une forte charge hydraulique.

Toutes ces observations nous permettent, dans une certaine mesure, d'ajuster ce modèle de bilan hydrique des vertisols dégradés. L'état actuel de nos connaissances sur le fonctionnement hydrique de ces sols nous limitent à cet ajustement. Nous nous en contenterons pour la suite de notre travail.

### **5.3. TENTATIVE D'ETUDE DE L'EVOLUTION DES RESERVES HYDRIQUES TOTALES A L'AIDE DE LA MODELISATION.**

A partir de ce modèle de bilan hydrique établi sur vertisol dégradé, nous pouvons par exemple simuler les conditions d'un aménagement en microcatchment, et déterminer ainsi l'intérêt d'un tel

traitement dans la gestion des eaux de pluies. Par ailleurs, la modélisation ouvre d'autres perspectives, notamment en ce qui concerne l'incidence de la variabilité pluviométrique interannuelle et sur l'évolution des réserves hydriques totales du sol.

Nous avons vu au chapitre IV que la répartition des réserves hydriques disponibles n'était pas homogène sur la tranche de sol 0-100 cm. Il est donc difficile d'estimer la disponibilité à partir des seules données de réserves hydriques totales sur cet horizon. La figure 5.7 indique la relation entre les réserves hydriques totales et les réserves hydriques disponibles, qui ont été calculées par addition des réserves hydriques disponibles estimées par tranche de sol. Il semble que l'on puisse considérer un seuil de réserve en eau totale au delà duquel l'eau stockée est en partie disponible pour les plantes. L'établissement d'une relation significative entre ces deux données apparaît problématique étant donné la forte dispersion des points(1). Nous nous contenterons, à titre indicatif, pour la suite des travaux de visualiser graphiquement le seuil estimé à 240 mm (figure 5.7). On sera ainsi, de façon grossière, renseigné sur les périodes de disponibilité en eau pour les différentes simulations considérées.

Nous utiliserons les données climatiques et les paramètres définis sur l'année 1989. Les courbes estimées d'évolution des réserves hydriques de cette année serviront donc de référence.

### **5.3.1. Evolution prévisible des réserves en eau totale pour un aménagement microcatchment.**

Si on considère que le ruissellement issu de l'impluvium entre en totalité sur la parcelle aval, la pluie efficace, qui doit être prise en compte dans le modèle, correspond alors à la pluviosité augmentée d'une valeur égale au ruissellement calculé selon la formule de THEBE (1987) sur vertisol dégradé (équation 2).

Les résultats sont représentés sur la figure 5.8.

Les réserves hydriques estimées ne correspondent pas aux mesures effectuées sur le terrain (voir chapitre IV). Nous avons vu que l'inefficacité relative de ce traitement était due en grande partie aux difficultés rencontrées de maintenir en état les diguettes de retenue. Les valeurs estimées sont très élevées, proche de la réserve

---

(1) La régression linéaire entre les deux variables, en éliminant les valeurs de réserve hydrique totale inférieure à 240 mm présente un coefficient de régression  $r^2$  de 0,630 pour 93 observations, significatif au seuil de 5 % d'erreur mais néanmoins relativement faible.

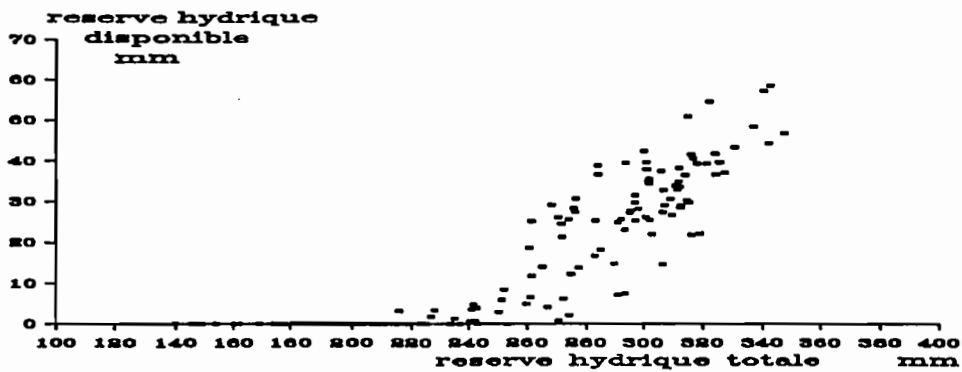


Figure 5.7 : Relation entre la réserve hydrique totale et la réserve hydrique disponible (au seuil de  $\Phi = -1,6$  MPa) sur l'horizon 0-100 cm, les points correspondent aux mesures moyennes de l'année.

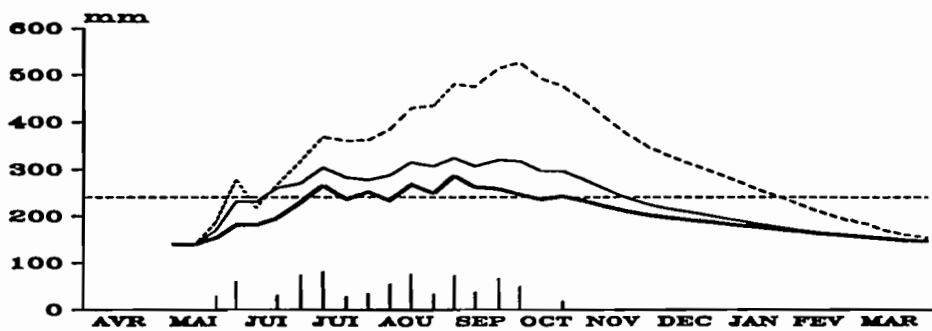


Figure 5.8 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques, de l'horizon 0-100 cm, pour l'aménagement en microcatchment (---), comparé à la simulation de l'aménagement en casiers avec culture de contre-saison (—), et d'une parcelle traditionnelle cultivée en sorgho de saison des pluies (···). La limite (···) représente un seuil de présence ou absence de disponibilité en eau sur l'horizon 0-100 cm.

hydrique à la capacité au champ sur l'ensemble de l'horizon 0-100 cm. Rien ne nous permet d'affirmer qu'il est effectivement possible d'atteindre ces réserves hydriques totales. Cependant nous savons que les vitesses de circulation de l'eau sont extrêmement faibles dans les vertisols, en l'absence de macroporosité fissurale. La capacité d'emmagasiner, dans le temps, de l'eau est donc réduite, ce qui, favorise les pertes en eau dans le bilan hydrique.

La modélisation devrait donc prendre en compte les relations étroites liant les phénomènes d'évaporation, de ruissellement et de drainage, à l'évolution des teneurs en eau du sol.

Cependant, la figure 5.9 montre qu'un apport supplémentaire correspondant à 10 et 20 % de la pluviosité tombée sur l'impluvium augmenterait respectivement de 10 et 23 % la réserve hydrique totale pendant la 3<sup>ème</sup> décade du mois de septembre. Il suffirait donc de canaliser environ un tiers du ruissellement sur l'impluvium vers la parcelle avale pour obtenir une amélioration d'un quart du stock hydrique total.

### **5.3.2. Influence d'une période de sécheresse pendant la saison des pluies.**

Une des contraintes majeure à la réussite d'une culture de saison des pluies est l'effet souvent néfaste d'une période de sécheresse relative pendant la période de forte croissance de la plante.

Nous avons considéré une diminution de la pluviosité, sur les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> décades de juillet et sur la 1<sup>ère</sup> décade du mois d'août. Le modèle utilisé est celui d'un vertisol dégradé cultivé en sorgho de saison des pluies.

La figure 5.10 représente la simulation d'un tel scénario. La baisse des réserves hydriques totales est effective pendant la période de sécheresse, par contre, une baisse de 20 % en juillet et en août de la pluie, induit paradoxalement une augmentation des réserves hydriques pendant le mois de septembre, période correspondant, en général, à la floraison. Les mêmes observations apparaissent avec une baisse de 80 % des pluies.

Ces phénomènes s'expliqueraient par la "réouverture" du réseau fissural, provoquée par une baisse des teneurs en eau en cas de sécheresse. On a alors une capacité accrue de mise en réserve de l'eau dans le sol. Le modèle prend aussi en compte la diminution de la

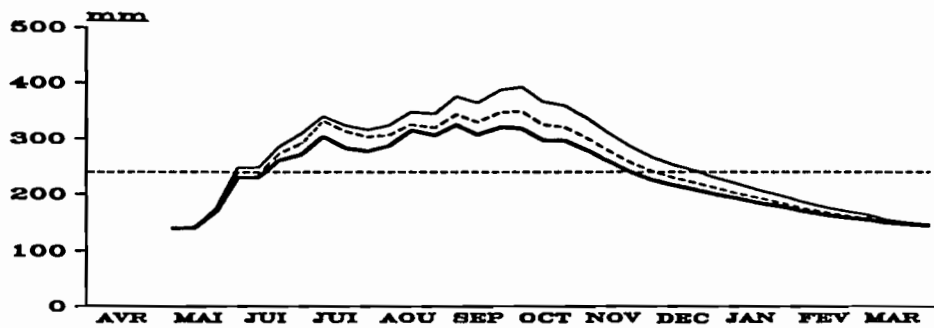


Figure 5.9 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur un aménagement en microcatchment; les apports supplémentaires en eau correspondent à 10 % (---) et 20 % (—) de la pluie tombée sur l'impluvium. La courbe (—) représente le cas d'un apport nul. La limite (· · ·) représente un seuil de présence ou absence de disponibilité en eau sur l'horizon 0-100 cm.

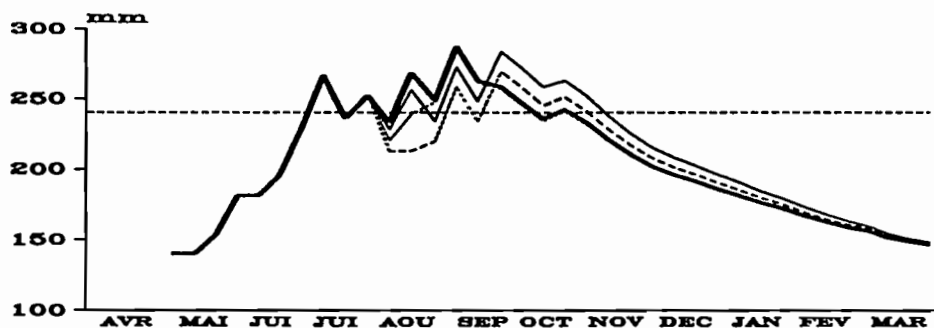


Figure 5.10 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de saison des pluies (—), avec des hauteurs précipitées pour les 2 et 3èmes décades de juillet et la 1ère décade d'août inférieures de 20 % (—), 50 % (· · ·) et 80 % (---) par rapport à celle de l'année 1989. La limite (· · ·) représente un seuil de présence ou absence de disponibilité en eau sur l'horizon 0-100 cm.

réserve hydrique totale au dessous du seuil (Lhs), qui délimite la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique.

Pour une culture de saison des pluies, l'effet d'une période de sécheresse pendant le cycle cultural sera fonction de l'ampleur de la baisse des hauteurs précipitées ; une sécheresse peu intense pourra provoquer une efficacité accrue du stockage de l'eau au cours des épisodes pluvieux suivants. Un déficit hydrique préjudiciable à la plante peut par contre apparaître pendant la période de sécheresse. Il aurait fallu, toutefois, une diminution d'environ 50 % des hauteurs pluviométriques pour avoir pendant deux décades des réserves hydriques qui se situent en dessous du seuil de disponibilité en eau.

Le même scénario a été simulé dans le cas d'un aménagement en casiers. Les résultats sont présentés sur la figure 5.11.

La réserve hydrique totale à la fin du mois de septembre est peu modifiée par une phase de sécheresse au cours de la saison des pluies. Sur les casiers, en ce qui concerne la réserve en eau du sol au moment du repiquage d'un sorgho de contre saison, les effets d'une telle sécheresse sont limités. Seul un arrêt prématuré des pluies limiterait le stock hydrique total en fin de saison des pluies et diminuerait la durée de disponibilité de l'eau, comme l'indique la figure 5.12 ; une diminution de 25 % et de 50 % des hauteurs précipitées par rapport à l'année 1989 aurait réduit la période de disponibilité, respectivement, de une et deux décades.

Pour obtenir une forte différence sur la mise en réserve de l'eau dans le sol, on remarque donc qu'il est nécessaire de simuler des variations de hauteurs précipitées importantes. Les vertisols dégradés semblent donc jouir d'un pouvoir "tampon" important contre les variations interannuelles de la pluviosité, ce qui limite les risques de pertes de récolte en cas de sécheresse.

Enfin, nous connaissons peu les effets d'un excès d'eau sur le comportement d'une culture de saison des pluies, alors qu'ils constituent un risque majeur sur ce type de sol. Ces observations révèlent de nouveau l'importance de la macroporosité fissurale sur le fonctionnement hydrique des vertisols. Il serait donc utile de connaître les relations existant entre les teneurs en eau et la dynamique de fissuration de ces sols, afin d'affiner les prévisions relatives à l'évolution des réserves hydriques totales.

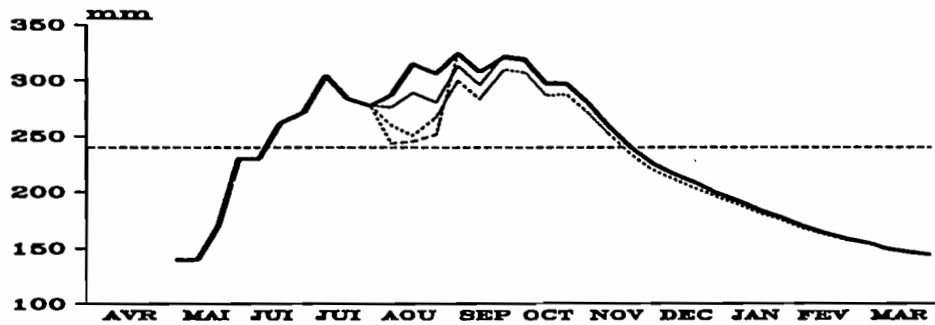


Figure 5.11 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de contre-saison aménagée en casiers (—), avec des hauteurs précipitées pour les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> décades de juillet et la 1<sup>ère</sup> décade d'août inférieures de 20 % (—), 50 % (···) et 80 % (---) par rapport à celle de l'année 1989. La limite (···) représente un seuil de présence ou absence de disponibilité en eau sur l'horizon 0-100 cm.

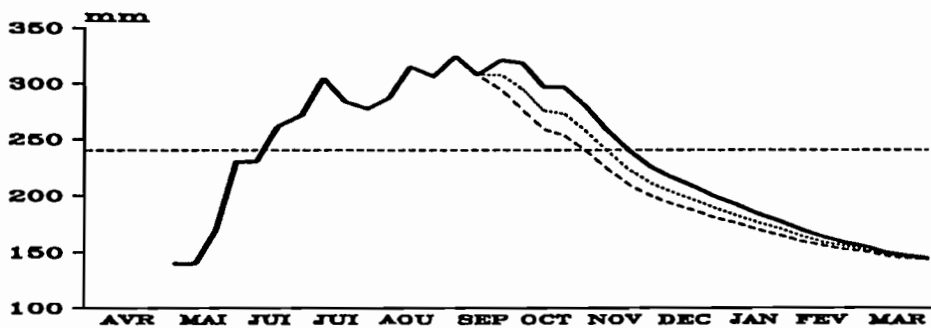


Figure 5.12 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de contre-saison aménagée en casiers (—), avec des hauteurs précipitées à partir du mois de septembre inférieures de 25 % (···) et 50 % (---) par rapport à celle de 1989. La limite (···) représente un seuil de présence ou absence de disponibilité en eau sur l'horizon 0-100 cm.



#### 5.4. CONCLUSION A LA MODELISATION DU REGIME HYDRIQUE DES VERTISOLS.

Les connaissances incomplètes des relations existantes entre les différents termes du bilan hydrique des vertisols dégradés nous ont obligé à simplifier la modélisation du régime hydrique. Les hypothèses émises, bases de notre travail, ont été en partie vérifiées sur le terrain. Il convient d'effectuer de nouveau des observations afin notamment de chiffrer précisément les divers paramètres définis.

A cet égard, les principales hypothèses en suspens concernent :

- la détermination du seuil limitant la phase d'humectation et la phase de saturation hydrique, ce qui revient à préciser les relations entre la teneur en eau et la dynamique de fermeture du réseau fissural ;
- les rapports entre ETR et ETP pendant la phase de saturation du profil, en liaison avec les différentes phases du cycle de développement d'une plante cultivée par exemple ;
- les facteurs agissant sur l'état de dessèchement maximal, et leurs liaisons avec le retrait des argiles responsable de la macroporosité fissurale.

Par ailleurs, le modèle établi a des limites d'application.

Si la phase de dessèchement s'accommode d'une modélisation sur une période décadaire, l'unité de temps doit par contre être réduite pour les autres phases. En effet, dans notre cas, le passage entre la phase d'humectation et la phase de saturation se situe obligatoirement avant ou après une décade. Or, l'ensemble de la pluviosité de cette décade ne participe pas obligatoirement au passage d'une phase à l'autre. Les pluies d'une même décade peuvent en réalité participer à des bilans hydriques différents. L'unité de temps décadaire limite donc la précision du modèle. Pour effectuer la modélisation à l'échelle de l'averse, il convient donc d'étudier *in situ* la dynamique de ressuyage du sol après une pluie.

En zone aride et semi-aride, une des contraintes majeures sur le plan écologique et agronomique est la disponibilité de l'eau dans le sol, l'objectif de la modélisation du régime hydrique est donc de fournir des calendriers de réserves disponibles pour les végétaux. Nous avons vu précédemment que les réserves disponibles, sur les vertisols dégradés, sont concentrées dans les horizons supérieurs. La modélisation sur un seul réservoir, 0 à 100 cm de

profondeur, manque donc de précision lorsque l'on veut calculer les réserves disponibles. Nous devons donc considérer plusieurs réservoirs, d'où la nécessité de connaître les flux hydriques entre les différents horizons. Ces derniers seraient alors définis par la profondeur du réseau fissural et la répartition de l'enracinement des espèces végétales considérées.

Enfin, une meilleure connaissance de la dynamique de la macroporosité fissurale en fonction des facteurs physico-chimiques et climatiques ouvrirait des perspectives intéressantes pour la modélisation du régime hydrique sur les vertisols dégradés. On pourrait en effet évaluer les risques de dysfonctionnement hydrique et de dégradation, induits par les systèmes actuels d'exploitation de ces sols, ou par l'emploi de nouvelles techniques culturales.

La modélisation peut alors constituer un outil appréciable pour étudier le fonctionnement hydrique des sols, et contribuer à une meilleure réflexion sur l'aménagement des terres agricoles et pastorales.

**CHAPITRE VI.**

**AMENAGEMENT DES SOLS  
"HARDES" ET DES VERTISOLS  
DEGRADES AU NORD-CAMEROUN.**

Après avoir étudié la modification du régime hydrique des vertisols plus ou moins dégradés, il nous faut revenir dans ce dernier chapitre sur la problématique de la réhabilitation des terres marginales du Nord-Cameroun, en élargissant, notamment, notre point de vue sur les moyens nécessaires à mettre en oeuvre pour l'exploitation de ces sols.

Nous aborderons donc tour à tour la question de la régénération des sols "hardés", puis de la mise en culture des vertisols dégradés. Ceci nous amènera, dans chacun des cas, à proposer des voies d'aménagement et d'utilisation de ces terres marginales. La figure 6.1 en sera le fil conducteur. Enfin, une réflexion d'ensemble sur le bassin versant de Mouda montrera, pour terminer, l'intérêt des aménagements dans cette région.

## **6.1. REGENERATION DES SOLS "HARDES".**

Après être revenus sur les moyens d'améliorer le régime hydrique des sols "hardés", nous allons considérer d'autres aspects en vue de la régénération à savoir le statut organique et la porosité biologique de ces sols.

### **6.1.1. Fonctionnement hydrique et régénération des sols "hardés".**

Les sols "hardés" sont caractérisés par un dysfonctionnement du régime hydrique, qui implique une limitation des ressources en eau disponibles pour les végétaux. Les obstacles à l'infiltration de l'eau sont la croûte de battance, et la faible conductivité hydraulique de ces sols en l'absence de réseau fissural. Etant donnée la nature originelle de type vertique de ces sols, l'acquisition d'un réseau fissural est

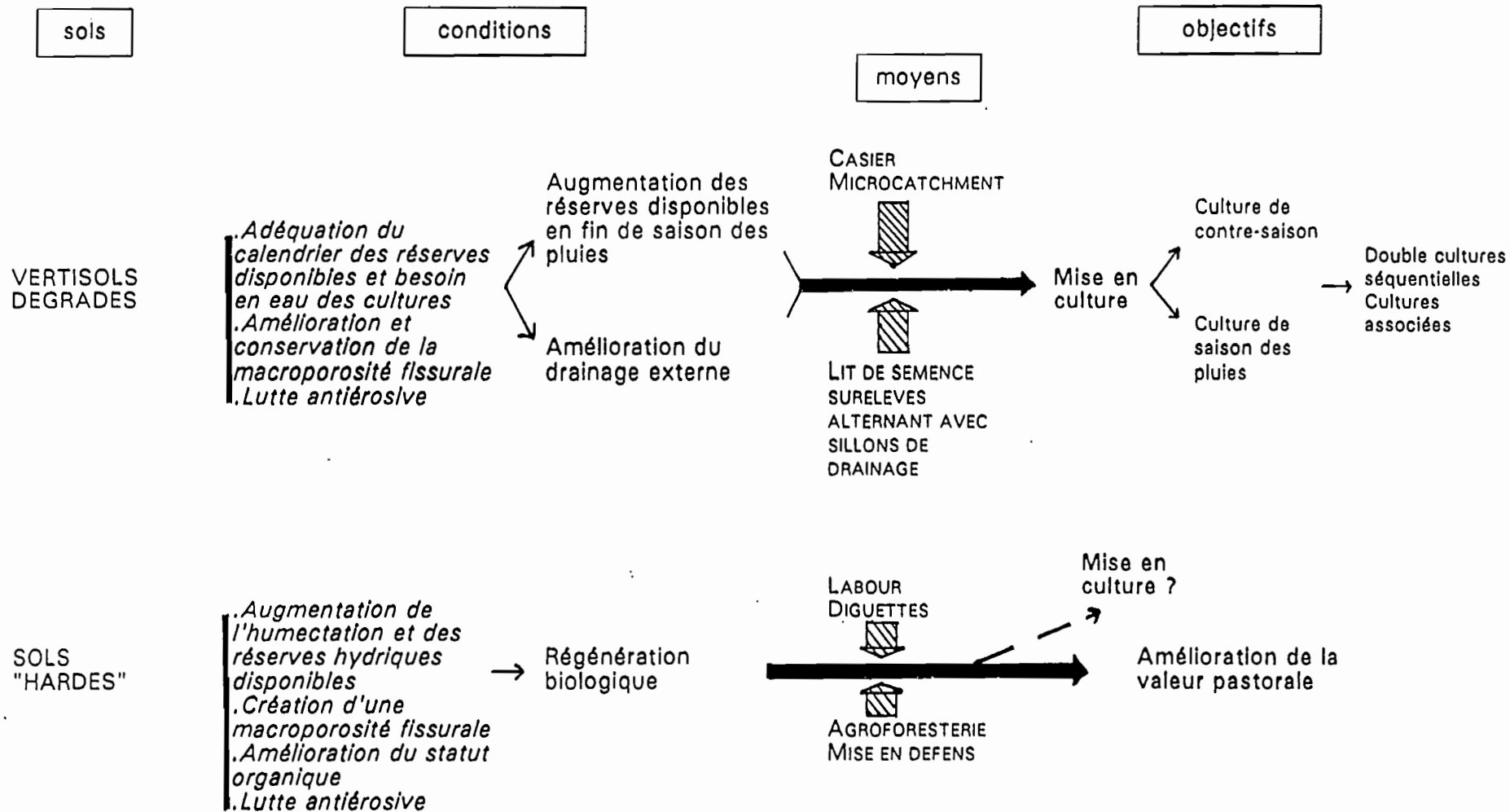


Figure 6.1 : Amélioration du régime hydrique et réhabilitation des sols "hardés" et des vertisols dégradés .

conditionnée par l'établissement d'un cycle humectation-dessiccation en profondeur.

Nous avons vu que l'amélioration du fonctionnement hydrique par des petits ouvrages hydro-agricoles pour limiter le ruissellement ne donnait que des résultats partiels au bout de deux ans. Afin de mieux juger de l'intérêt de ces aménagements, il faudra certainement attendre les prochaines observations faites sur l'évolution de l'humectation du profil en profondeur et sur la constitution des réserves. De même, la caractérisation des argiles constituantes des sols "hardés" devrait nous donner des renseignements sur leur capacité de stockage en eau.

Cependant, nous pouvons citer le cas dans la région de Maroua d'une réhabilitation de sols "hardés" d'origine vertique. En effet, dans le cadre d'un besoin important de terres pour la culture de "muskwaari" au cours des trente dernières années (chapitre II), des aménagements en casiers ont permis la mise en culture de certaines terres non propices, a priori, à la production de sorgho de contre-saison (CEE, 1988 ; SEIGNOBOS, *in press*). Les sols sur lesquels ont été constitués ces implantations sont situés en général sur des parties hautes de toposéquences et présentent les caractéristiques de dégradation des vertisols, avec, notamment, un réseau fissural très limité. Les agriculteurs désignent ces terres par le terme *karal hardé*, montrant ainsi l'origine "hardé" de ces sols avant leur mise en culture. Il semble que la mise en place de diguettes se soit faite progressivement en partant d'un carroyage relativement lâche dont les dimensions ont été modifiées en fonction des observations sur le comportement de la culture au fil des saisons. L'aménagement en casiers sur ces terres est primordial, il est d'ailleurs, pour les paysans, le premier critère de distinction dans leur propre typologie des sols de la région.

Au dire des paysans, la mise en culture en "muskwaari" est possible 3 à 4 ans après l'aménagement en casiers. Ce type de pratique est actuellement testé sur le site expérimental de Mouda.

Cet exemple tend à confirmer que les aménagements de conservation des eaux, indispensable à la réactivation hydrique, sont une condition essentielle à la réhabilitation des sols "hardés" d'origine vertique, pour lesquels le dysfonctionnement hydrique constitue la principale conséquence de la dégradation.

Toutefois, d'autres aspects doivent être considérés pour la régénération de ces sols en vue du maintien des conditions de fertilité

du milieu ; il s'agit essentiellement de l'amélioration du statut organique et de la porosité biologique.

### **6.1.2. Amélioration du statut organique et de la porosité biologique.**

La matière organique joue un rôle important dans la stabilité structurale et la fertilité chimique des sols. Selon SEINY BOUKAR (1990), la dégradation des vertisols s'accompagne d'une diminution des taux de matière organique. A contrario, l'amélioration du statut organique serait un gage à un maintien durable de la fertilité de ces sols.

La jachère constitue le principal mode de reconstitution du statut organique des sols en région soudano-sahélienne. Le raccourcissement de sa durée, voire l'abandon de ce principe sont souvent avancés comme principales causes de la dégradation des sols (FLORET et PONTANIER, 1991). FELLER *et al.* (1991) indiquent un temps minimal de cinq années de jachère, nécessaire au renouvellement du stock organique. De même, les premières conclusions des travaux de DONFACK (1991), au Nord-Cameroun, montre que le retour à une savane pseudoclimacique après abandon n'est réalisé qu'au bout de 6 à 12 ans dans la plupart des milieux.

Afin d'accélérer la régénération des sols "hardés", les techniques d'agroforesterie, et notamment la pratique de la jachère arborée améliorée, pourraient être une voie de régénération des sols "hardés", surtout dans un contexte de limitation de la durée de la jachère (PELTIER *et al.*, 1989 ; FELLER *et al.*, 1991). SEINY BOUKAR (1990) indique que les foyers de réactivation biologique du sol proviennent le plus souvent des ligneux. L'arbre, par l'action de son système racinaire joue également un rôle dans l'amélioration de la porosité biologique favorisant ainsi l'humectation des horizons plus profonds. Des essais de réhabilitation de sols dégradés, menés par le Centre de Recherche Forestière de Maroua, ont effectivement montré l'efficacité de l'association arbre-diguette sur l'humectation en profondeur de sols extrêmement compacts de type planosols (EYOG MATIG, 1989). Enfin, GROUZIS *et al.* (1991) considèrent que la reconstitution des écosystèmes dégradés dans les régions sahéliennes doit reposer sur l'association herbacées-ligneux.

Les études dans ce sens, actuelles ou à venir, devront confirmer l'importance de la végétation ligneuse associée à des pratiques de

conservation de l'eau dans la réactivation biologique des sols "hardés" de nature vertique.

L'ensemble de ces aménagements en vue de la réhabilitation des sols "hardés" peuvent nécessiter une nouvelle définition des modes de gestion de l'espace agricole et pastoral. On pense en particulier aux temps de jachère et aux problèmes de surexploitation des ressources naturelles, à l'origine également de la dégradation<sup>(1)</sup>. Ceci nous amène à poser la question de la place des sols "hardés" dans les systèmes de production au Nord-Cameroun.

L'emploi du terme "hardé" a été généralisé pour désigner des sols dégradés. Cependant, ces sols peuvent se différencier par leur nature, l'origine de la dégradation, et leur place dans le système de production. Une réflexion sur leur aménagement doit inévitablement prendre en compte ces différents aspects.

La place de la terre dans le système de production peut être variable. Ainsi, dans les zones de mise en culture intensive des vertisols, SEIGNOBOS (*in press*) considère que les "hardés" constituent des terres maintenues délibérément en parcours, pour l'alimentation des animaux. Par ailleurs, de nombreux villages sont entourés d'une auréole de terres dégradées et abandonnées à la suite d'une surexploitation et d'un épuisement de la fertilité. La réhabilitation devra d'un côté permettre une amélioration de la valeur pastorale, et de l'autre aboutir à une remise en culture de sols dégradés dans le cadre des besoins en terres cultivables. La connaissance plus approfondie de l'utilisation des sols "hardés" devrait nous renseigner non seulement sur les causes et les processus de dégradation, mais aussi sur les moyens judicieux à utiliser pour leur réhabilitation.

## 6.2. MISE EN CULTURE DES VERTISOLS DEGRADEES.

Les vertisols dégradés présentent un dysfonctionnement hydrique moins conséquent que celui observé sur les sols "hardés". Ces sols conservent donc de réelles potentialités pour une

---

(1) De nombreux auteurs ont ainsi montré les effets bénéfiques sur les ligneux d'une simple mise en défens vis à vis des animaux, de la coupe du bois de chauffage et des feux de brousse (TOUTAIN et PIOT, 1980 ; PELTIER *et al.*, 1989).



mise en culture. Cependant, suite à la dégradation, la diminution de la mise en réserve de l'eau disponible augmente les risques d'échec pour une culture de contre-saison, qui constitue le principal mode d'exploitation des vertisols dans le Nord-Cameroun (chapitre II). Par ailleurs, en saison des pluies, les risques d'engorgement temporaire demeurent élevés, amenant les paysans à préférer les sols à texture plus grossière pour la plupart des productions vivrières et industrielles.

Nos résultats sur l'amélioration du régime hydrique des vertisols dégradés ont montré que ces sols, grâce à des aménagements comme les casiers et les diguettes peuvent rapidement retrouver des caractéristiques proches des vertisols non dégradés (chapitre IV).

Pour la suite de notre réflexion sur l'aménagement des vertisols dégradés, nous allons considérer, dans un premier temps, les perspectives liées à la culture de contre-saison. Puis, nous examinerons celles liées à la culture de saison des pluies et les possibilités d'intensification. Nous nous aiderons pour cela des travaux effectués plus spécialement sur l'exploitation des vertisols.

### **6.2.1. Utilisation des vertisols dégradés en culture de contre-saison.**

La réussite d'une culture de contre-saison, en particulier sur un vertisol dégradé, est conditionnée principalement par les réserves disponibles en eau au moment du repiquage, en fin de saison des pluies.

Sur le bassin versant de Mouda nous avons vu qu'un carroyage serré à l'aide de diguettes d'une hauteur de 15 à 20 cm assurait la meilleure efficacité pour améliorer les réserves hydriques du sol.

L'utilisation de diguettes, organisées en casiers ou non, est d'ailleurs une pratique connue dans certaines régions de l'Extrême-Nord du Cameroun.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'utilisation de ce type d'aménagement devient parfois une condition obligée à la réussite d'une culture de sorgho de contre-saison. Sur les bordures de la vaste plaine inondable des yaérés, zone climatique plus aride soumise à une pluviosité de l'ordre de 400 à 500 mm, nous pouvons voir également des aménagements hydrauliques conséquents édifiés sur des vertisols pour la culture de contre-saison. Ce sont pour l'essentiel d'importantes diguettes linéaires d'une hauteur pouvant atteindre un mètre de hauteur. Les sols concernés ne sont pas, à proprement dit,

dégradés ; en général les fentes de retrait sont présentes et abondantes pendant la saison sèche. Ces diguettes ont pour rôle principal de concentrer le maximum d'eau sur une surface restreinte. Les conséquences sont non seulement l'augmentation des réserves hydriques disponibles sous ces climats plus sahéliens, mais aussi la création d'une charge hydraulique élevée favorisant l'infiltration de l'eau à travers le réseau fissural.

Par ailleurs, FREEBAIRN et WOCKNER (1986) ont démontré l'efficacité de diguettes édifiées suivant les courbes de niveau sur la limitation des phénomènes d'érosion pendant la saison de pluies. Ce type d'aménagement, reconnu peu coûteux et efficace pour la conservation de l'eau et des sols, est largement conseillé sur les vertisols en Australie, au Texas et en Uruguay (PUENTES *et al.*, 1988).

Les diguettes sont donc un outil important non seulement pour l'amélioration de la production, mais aussi pour la limitation du risque d'échec de la culture et le maintien des conditions de bon fonctionnement hydrique des vertisols. Elles sont dans ce sens un gage de mise en place d'une productivité durable et devrait pouvoir se généraliser.

D'après nos observations sur l'expérimentation de Mouda, et les propos des paysans de la région de Maroua, quelques règles simples peuvent être énoncées sur les dimensions d'un carroyage à l'aide de diguettes. Nous pensons d'abord que, pour créer une charge hydraulique conséquente, les diguettes doivent être totalement imperméables (chapitre IV). Les dimensions du carroyage sont en relation directe avec l'ampleur de la dégradation et du dysfonctionnement hydrique. La largeur du maillage détermine la hauteur des diguettes utilisées, considérant qu'un maillage plus large implique une augmentation de la hauteur des diguettes. Pour un maillage de l'ordre de 5 m, une hauteur de 0,20 à 0,25 m semble suffisante, alors que, pour des cloisonnements de l'ordre de 10 à 20 m, la hauteur devrait atteindre environ 0,30 à 0,35 m. Notons par ailleurs que, dans les régions citées précédemment, la hauteur des levées de terre s'élève à près d'un mètre pour des longueurs de diguettes, sans cloisonnement, atteignant une centaine de mètres. Naturellement, ces dimensions, données à titre indicatif, sont également modulées par la nature granulométrique exacte des horizons de surface, qui entrent en jeu, en général, dans la confection des diguettes.

La pratique du carroyage apparait essentielle pour une remise en culture en contre-saison des vertisols dégradés, par contre elle peut être un inconvénient pour l'exploitation de ces sols en culture de saison des pluies.

### **6.2.2. Utilisation des vertisols dégradés en culture de saison des pluies.**

Nos résultats sur le bassin versant de Mouda ont montré que les risques de déficit hydrique, sur les vertisols dégradés, ne sont pas importants en saison des pluies. Par contre, tout aménagement visant à réduire le ruissellement, tel que le buttage, induit un risque d'engorgement préjudiciable à la culture. On rejoint à cet égard les difficultés que l'on rencontre pour les culture de saison des pluies sur les vertisols modaux.

Dans la province de l'Extrême-Nord du Cameroun, la culture de saison des pluies sur vertisols est plus rare que celle de contre-saison. Les principales contraintes à ce mode d'utilisation sont les risques d'engorgement de l'horizon cultivé, et la difficulté de réaliser les façons culturales nécessaires à la culture.

Cependant, dans certaines régions, l'absence de sols à texture plus grossière oblige les paysans à utiliser les vertisols pour la production de sorgho et de coton en saison des pluies. Les paysans n'emploient aucune technique culturale particulière pour assurer un meilleur drainage externe. Ils se contentent en général de réaliser ces cultures dans les parties les plus hautes donc les mieux drainées.

Dans d'autres zones, des aménagements ont été testés et vulgarisés pour permettre un meilleur drainage des vertisols en saison des pluies. Ils consistent essentiellement au modelage de la surface du sol, avec une alternance de bandes surélevées et de sillons assurant l'évacuation des eaux excédentaires, la figure 6.2 schématise ce type d'aménagement qui pourrait être appliqué à une culture de sorgho. La largeur des bandes doit être suffisante pour retenir l'eau en début de saison des pluies et assurer ainsi une humectation prolongée du lit de semence ; le semis sur billon avec un rang de culture donnerait en effet des résultats peu satisfaisants ; le dessèchement serait trop rapide dans l'environnement de la graine (SINGH et NDIKAWA, *communication verbale*).

Ces techniques ont été largement développées par l'ICRISAT, sur les vertisols de la zone semi-aride en Inde (SWINDALE, 1988). En

zone tropicale humide, les aménagements pour assurer le drainage externe sont nécessaires. Ils sont basés sur une sur-élévation des lits de semences, sur une largeur plus ou moins importante en fonction notamment de la possibilité de mécanisation des travaux. AHMAD (1988) emploie le terme de "poldérisation" en vue de l'exploitation de ces sols en saison des pluies.

Pour l'utilisation des vertisols dégradés, il se présente une forte dualité entre la culture de saison des pluies et la culture de contre-saison. Toutefois, une complémentarité entre les deux est possible ; celle-ci doit permettre ainsi d'intensifier l'exploitation des vertisols même dégradés, moyennant un contrôle adéquat des eaux de pluies.

### **6.2.3. Voie d'intensification de l'utilisation des vertisols dégradés.**

Outre l'augmentation globale de la production, l'amélioration de la productivité sur certains sols est aussi un moyen de libérer des terres surexploitées et dégradées, où une mise en jachère s'avère nécessaire pour une reconstitution de leur fertilité.

Nous allons dans un premier temps considérer d'une façon plus général les possibilités d'intensification sur les vertisols.

WILDING et PUENTES (1988) note ainsi que les vertisols ont des ressources considérables souvent "sous-utilisées". SWINDALE (1987) considère qu'en zone semi-aride les vertisols sont les sols les plus productifs pour une agriculture de saison des pluies. En Inde, les systèmes de production intensifs, qui sont développés, sont des systèmes de double culture séquentielle avec pour la même année une culture de contre-saison succédant à une culture de saison des pluies, ou bien encore des systèmes de cultures associées en saison des pluies. Les travaux de l'ICRISAT ont montré qu'il était possible d'obtenir une augmentation de 100 à 300 % de la production avec un système de culture "amélioré" par rapport au système traditionnel (SWINDALE, 1988). L'expérimentation en station de ces systèmes intensifiés a été également été réalisée avec succès en Afrique (JUTZI et ABEBE, 1987).

Le centre de recherche agronomique de Maroua effectue actuellement des essais agronomiques de double culture séquentielle. Les premiers résultats sont très satisfaisants avec un gain de production de l'ordre de 500 à 600 % par rapport au système traditionnel (SINGH et NDIKAWA, 1989). De même, dans la vallée de

la Bénoué VERNIER *et al.* (1987) ont obtenu de très bons résultats avec une culture de riz pluvial suivi d'une culture de "muskwaari". Toutes ces possibilités d'intensification de la productivité sur les vertisols sont directement liées à des aménagements nécessitant un travail important de mise en place.

La figure 6.2 présente les possibilités d'associer les deux types de culture sur des vertisols. Nous pensons que, sur les vertisols dégradés, ce type d'aménagement devrait être possible et pourrait supporter une relative intensification. La condition première serait la mise en place d'aménagements visant à restaurer, et à maintenir, le fonctionnement hydrique spécifique de ces sols.

### 6.3. REFLEXIONS SUR LE BASSIN VERSANT DE MOUDA.

Nous pouvons prendre le bassin versant de Mouda comme exemple concret d'aménagement pour une réhabilitation des sols dégradés. Notre réflexion est basée sur la carte des systèmes écologiques de Mouda (figure 6.3), établie par le Centre National des Sols du Cameroun (CEE, 1988 ; SEINY BOUKAR, 1990).

L'environnement pédologique de ce bassin est caractérisé par la présence de sols à texture argileuse, les vertisols (71 % de la surface du bassin versant), et des sols à texture plus grossière essentiellement représentés par les sols ferrugineux et fersiallitiques aux abords du massif de roches vertes (29 % du bassin versant). La proportion des sols dégradés est importante, puisque, 82 % des vertisols présentent des faciès de dégradation.

Les sols ferrugineux et fersiallitiques sont exploités pour les productions de saison des pluies (sorgho, coton, arachide, niébé...). Leur étendue étant restreinte, les vertisols aux abords du village de Mouda sont également exploités en saison des pluies. La production de "muskwaari" est essentiellement localisée sur des "karals" situé à plus de 5 km voire 10 km du village de Mouda. Entre le village et ces vertisols modaux se trouve une vaste étendue de sols "hardés", utilisés comme parcours pastoraux, zones de cueillette et de prélèvement de bois.

Les surfaces cultivables en système traditionnel semblent limitées, les sols cultivés représentant 12 % de la surface du bassin versant. Dans un contexte de besoins alimentaires et en bois

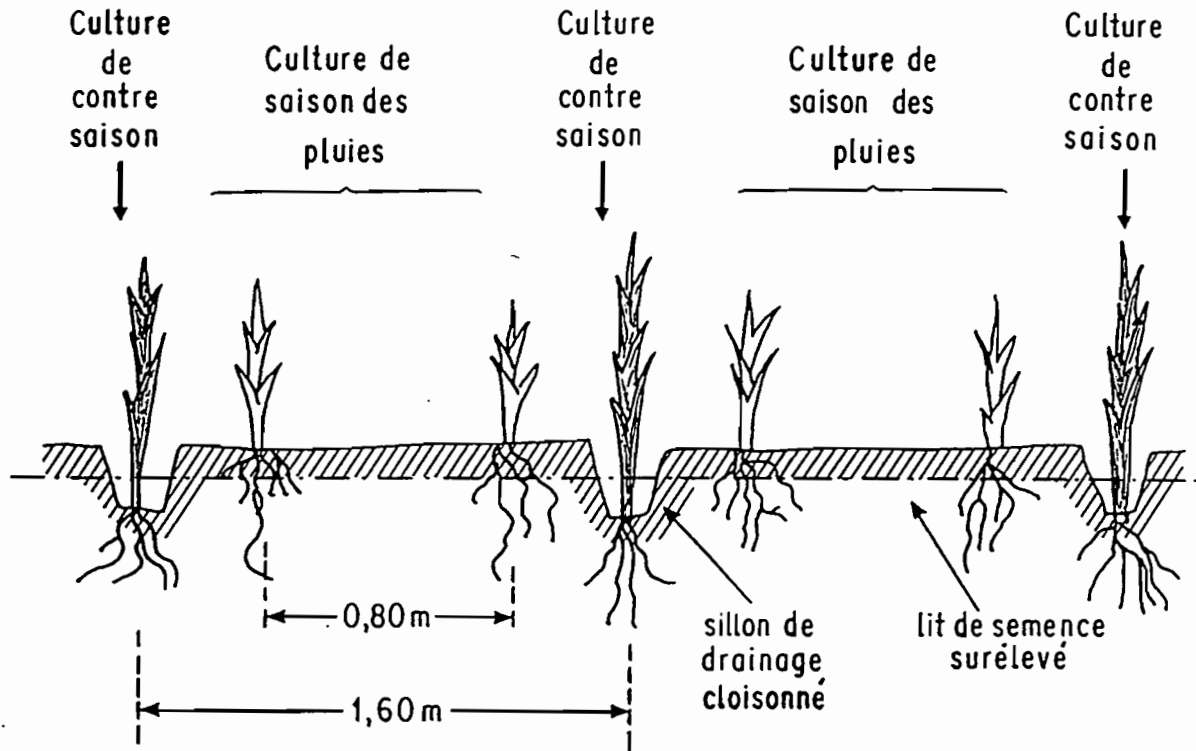


Figure 6.2 : Aménagement des vertisols dégradés pour un système de double culture séquentielle, une production de saison des pluies suivi d'une culture de contre-saison (principe du lit de semence surélevé).

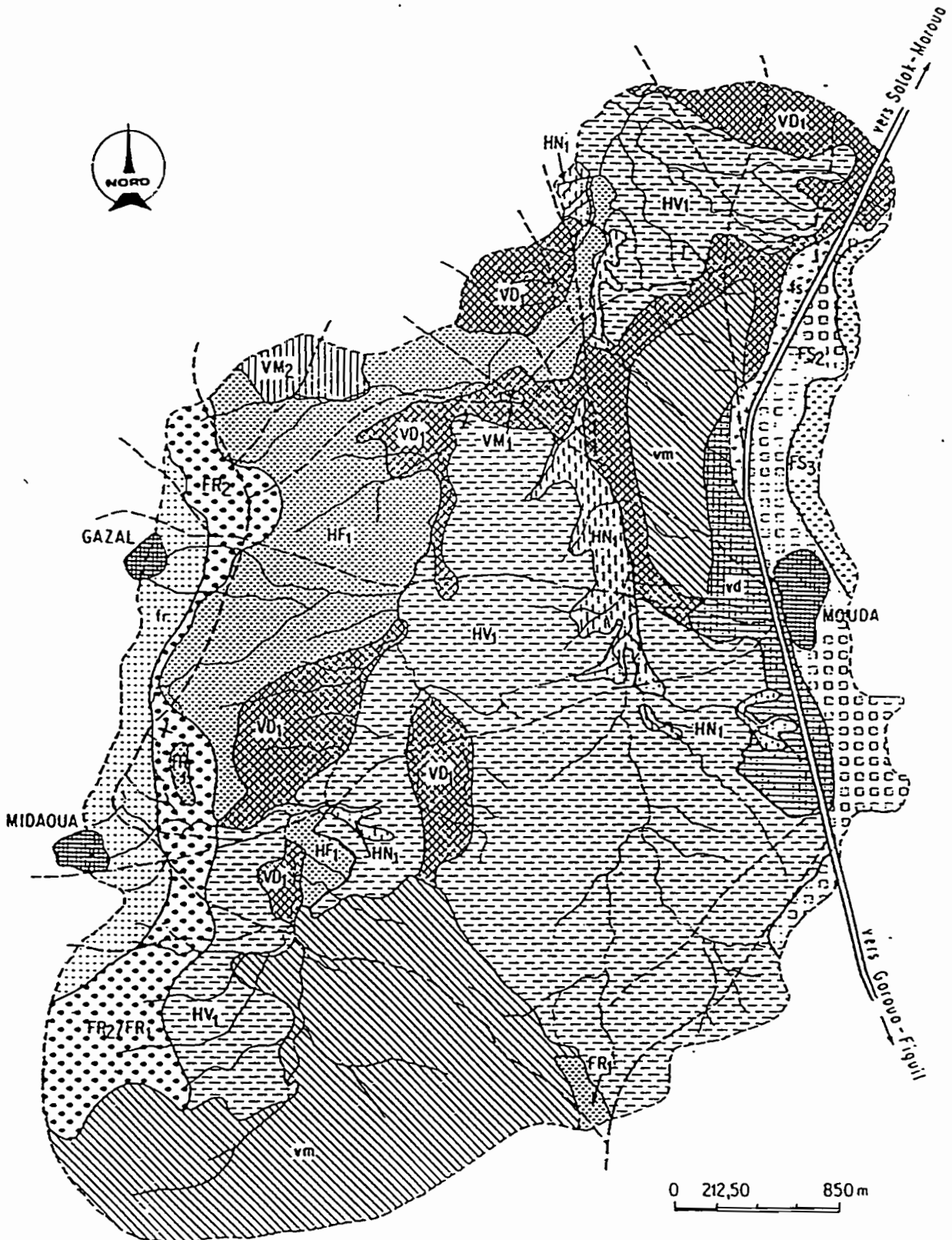


Figure 6.3 : Cartes des systèmes écologiques du bassin versant de Mouda, Nord-Cameroun. La légende se trouve sur la page suivante.

SIOLES DES SYSTEMES		AFS3	AFS2	AF1	AF0	VM2	VM1	VM	VD	VD	HV1	HNI	HFI	FR2	FR	A														
RELIEF LITHOLOGIE GEOMORPHOLOGIE (SECTEURS ECOLOGIQUES)		Collines et versants de recroisement-pente 3 à 20 % altitude 450/600 m, série volcanosédimentaire de Maroua. Roches basiques et affleurements de roches acides				Glacis couvant à pente douce 3 à 1-5. Façonné sur des argilles sombres à nodules calcaires; griffes et bad-lands à l'aval et à proximité des axes de drainage. Altitude : 440 / 460 m						Pénéplaine avec bombements gaïsses et quartzites. Pente : 7 à 1 % Altitude : 500 / 450 m				Lits mineur majeur et terrasses du Mayo. Alluvions 440 - 450 m														
SOLS	TYPE PÉDOLOGIQUE DOMINANT	Sols peu évolués à facies fersalitique (Régosolique) vers le bas, sols fersalittiques à facies vertique				Vertisol à pédoclimat sec		Vertisol à pédoclimat sec - Facies dégradé planosolique localement hardé (solobets)			Iom - Facies dégradé régosolique (soobets)		Sols ferrugineux différenciés et indurés (charge importante). Localement facies planosolique dégradé en hardé (HFI)				Sol peu évolué alluvial													
	RUISSELLEMENT EROSION	Aulissement et érosion faible très localisé				Faible érosion. Aulissement fort et saturé en surface		Très fort ruissellement pouvant dépasser 50 %			Très fort ruissellement en surface		Aulissement et érosion moyens très sensibles et cultures				Faible													
	EFFICACITE MOYENNE DES PLUIES	90 - 100		80 - 90		75 - 80		80 - 90		50 - 70		65 - 80		20 - 50		90-100		80 - 90		80 - 90										
	R.U (mm/50 cm)	30/60		70/80		70 / 80				60 / 70		50 / 50		60 / 70		30 / 40		35 / 50		60 / 70										
ACTIVITES HUMAINES	HABITAT, POINTS D'EAU	Habitat, dense, quartiers (puits temporaires)				Pas d'habitat						Pas de point d'eau				Habitat dense (villages) qq. puits temporaires		néant qq. puits												
	UTILISATION DES TERRES	parcours, bois		plantations forêts		cultures jachère colon. all us saison		parcours bois		jachère ancienne parcours		culture sorgho de saison régulier		parcours bois		culture coton, sorgho contre saison jachère		Utilisation faible parcours et cueillette du bois				culture maïs jachère colon S.A.		parcours cueillette du bois		parcours				
VEGETATION SPONTANEE	TYPE PHYSIOMIQUE (FORMATION)	Savane arborée et herbeuse		savane parc herbacées		savane arbustive à épineux		culture ou chaume		savane arbustive à épineux		culture ou chaume		Savane arbustive très claire				culture ou chaume		savane arborée		savane arbustive		Alpaysive						
	ESPECES LIGNEUSES DOMINANTES	Baobab, Sterculia setigera, A. latocarpus, C. glutinosum		A. albidum, Piliostigma reticulata		(sauf va et vd) Acacia acacia, Acacia acacia, Comb. glom. Dich. glom.		Acacia hockii		Euphorbia, Euphorbia, Euphorbia, Euphorbia		Angelica latocarpus		Dichromy, Comb. glom. glutinosum		Miconia, Comb. glom. fraxinea.		Lernia, huedia, Sclero, caya, blures		A. latocarpus, S. setigera, P. reticulata		C. glutinosum, Arca sergalensis, P. reticulata		A. latocarpus, D. acrotyloides						
	ESPECES HERBACEES DOMINANTES	Andropogon gayanus, Thelepogon elegans		L. togoensis		Andropogon gayanus		Schoenel, gracilis, Orlans, Lagetia		S. gracilis, Michromy, latic, Arctium		Schizachy, riu edla, Orlans, lantaria		Dactyloctenium, Orlans, lantaria		Sporobolus, Orlans, alaxolone		Pennisetum, Orlans, pusilla		Pennisetum, Orlans, pusilla		Pennisetum, pedicellata								
	ETAT DU COUVERT VEGETAL	très bon		bon		faible sauf si culture		très bon		bon		faible sauf si culture		moyen		faible				très bon		bon		très bon						
% COUVERT DES PEREMNES	40 - 50		25 - 30		5		20 - 30		20 - 30		20 - 30		5		20		5 - 7		15		5 - 8		7		10-50		10-10		40 - 60	
SURFACE - en ha		18,5		106		12,5		148		225		55		603		62		205		69		106								
- en %		1,1		5,9		0,7		19,2		12		7,0		22,7		3,4		11,3		3,8		5,9								

Légende de la carte des systèmes écologiques du bassin versant de Mouda (CEE, 1988).



croissant, la réhabilitation des vertisols dégradés et des sols "hardés" s'avère donc nécessaire.

Les vertisols dégradés cultivés pourront être aménagés en casiers pour assurer leur fonctionnement hydrique. De même, ces aménagements doivent permettre une mise en culture des vertisols dégradés non cultivés, soit un apport possible de 12 % de terre doublant ainsi la surface cultivable. Par ailleurs, la réhabilitation des sols "hardés", avec à terme une remise en culture, permettrait de récupérer des terres à proximité des zones habitées. Enfin, l'emploi de systèmes de production de doubles cultures séquentielles et de cultures associées dégageraient des surplus de production, et une possibilité de laisser par ailleurs des terres en jachère, pour assurer une reconstitution de leur fertilité.

#### **6.4. CONCLUSIONS SUR L'AMENAGEMENT DES SOLS "HARDES" ET DES VERTISOLS DEGRADES.**

Cette réflexion sur l'aménagement ne tient compte que des potentialités hydriques offertes par les différents vertisols modaux et leurs faciès de dégradation après réhabilitation, avec comme soucis majeur la conservation d'une productivité durable.

La figure 6.1 présente un résumé des principaux objectifs et moyens pour la réhabilitation envisagés pour les sols "hardés" et les vertisols dégradés.

Le contrôle de l'eau sur les vertisols, a fortiori les vertisols dégradés, est primordial. Il convient de recréer ce milieu de confinement pour le maintien de la macroporosité fissurale, essentielle pour le fonctionnement hydrique optimal de ces sols, dont la principale caractéristique est d'offrir des réserves hydriques disponibles élevées, atout majeur pour les zones arides et semi-arides.

Cependant, d'autres aspects agronomiques n'ont pas été abordés dans notre réflexion. Il s'agit, par exemple, des problèmes liés à la fertilisation ou aux adventices des cultures. Il serait important de ne pas négliger ces facteurs surtout dans le cadre d'une intensification des cultures.

Enfin, nous nous sommes partiellement, voire totalement, démarqués du cadre socio-économique et des systèmes de production en général. Cette approche sera naturellement nécessaire si l'on envisage le développement harmonieux de cette région.

**CHAPITRE VII.**

**CONCLUSION GENERALE.**

Les études sur la réhabilitation des sols dégradés ont débuté par la description des différents systèmes écologiques dans région de Maroua au Nord-Cameroun, représentative de la zone soumise à un climat soudano-sahélien.

Les caractéristiques hydrologiques, pédologiques et phytoécologiques ainsi mises en évidence ont révélé d'importants phénomènes de dégradation des sols, et plus particulièrement sur les vertisols.

Les principales conséquences de la dégradation des caractéristiques physiques des horizons supérieurs de ces sols sont une augmentation des pertes en eau par ruissellement de surface et une baisse des réserves en eau disponible pour les végétaux.

L'approche proposée ici, sur la réhabilitation des terres marginales, s'est donc orientée vers l'étude d'aménagements de petite hydraulique de surface en vue de l'amélioration du régime hydrique de ces sols dégradés ; pitting, microcatchment, casiers, bandes alternées.

L'expérimentation, suivie en 1989 et 1990, a été réalisée sur deux types de sols appartenant à la série de dégradation des vertisols ; les sols "hardés" et les vertisols dégradés.

Les résultats obtenus sur les sols "hardés", faciès le plus dégradé, concerne l'augmentation de la profondeur humectée, ainsi que l'amélioration de la richesse floristique. Les aménagements les plus efficaces sont ceux qui combinent un travail du sol par labour et l'édification de diguettes d'une hauteur de 0,15 à 0,25 m de hauteur. Le travail du sol, en supprimant la croûte de battance et en augmentant la macroporosité dans l'horizon retourné, favorise l'infiltration et le stockage des eaux de pluies. La construction de diguettes ralentit voire arrête le ruissellement et la profondeur d'humectation a pu être doublée avec ce type d'aménagement.

Concernant les vertisols dégradés, qui présentent un réseau fissural en fin de saison des pluies, le problème de l'utilisation de ces

sols a été considéré suivant deux modes d'exploitation ; la culture de saison des pluies et la culture de contre-saison. Globalement, l'augmentation des réserves en eau est réalisée par des aménagements qui stoppent tout ruissellement de surface, créant dans le même temps une charge hydraulique élevée favorisant la circulation, à travers la macroporosité fissurale, de l'eau au moment des premières pluies. Ces résultats sont obtenus par un carroyage serré de diguettes hautes de 0,20 à 0,25 m. Cet aménagement en casiers induit de forte augmentation des réserves hydriques disponibles en fin de saison des pluies, et prolonge la durée de disponibilité ; globalement sur une année, les casiers augmentent les réserves hydriques totales de 30 à 40 % par rapport à une parcelle témoin non aménagée. Les risques d'échec pour une culture de contre-saison sont ainsi très limités. Le buttage provoque aussi l'augmentation de la profondeur humectée et des réserves en eau disponible. Toutefois, son utilisation pour la culture de saison des pluies présente peu d'intérêt sur les vertisols dégradés, voire même des inconvénients. Outre la difficulté de sa mise en place sur ces sols très argileux, le buttage crée en effet des conditions d'engorgement excessif préjudiciables à une culture de sorgho de saison des pluies. Or, la réussite d'une telle culture est conditionnée par un drainage externe efficace et des conditions de levée favorables.

Ces résultats ont par ailleurs révélé l'importance du réseau fissural pour le régime hydrique des vertisols. Cette macroporosité fissurale constitue en effet la principale voie d'humectation du profil, qui conduit à un stockage plus ou moins important de l'eau. Le maintien du fonctionnement hydrique de façon durable passe donc par la conservation des fentes de retrait. Il semble, à cet égard, que les vertisols nécessitent, pour maintenir en état leur fonctionnement hydrique, la présence d'aménagement créant un modelé de surface suffisant, qui jouerait un rôle analogue au relief de type gilgai.

La modélisation du bilan hydrique des vertisols dégradés permet de simuler et de tester le comportement de ces sols avec des scénarios pluviométriques différents. On a pu montrer ainsi que ces sols sont capables de "tamponner" une déficience simulée dans les précipitations ; une sécheresse de faible ampleur au cours de la saison des pluies permet la réouverture du réseau fissural et augmente le stockage de l'eau au cours des épisodes pluvieux suivants.

En résumé, la réhabilitation des sols "hardés" à partir de simples ouvrages hydro-agricoles apparaît limitée. Il semble important de

considérer les aspects biologiques des processus de régénération. L'amélioration du statut organique et la porosité biologique en sont les points principaux, ce qui nous a amené du point de vue de l'aménagement des sols à considérer la jachère naturelle ou améliorée comme des facteurs importants de cette réhabilitation. Par ailleurs, à partir d'une meilleure gestion des eaux de ruissellement, les vertisols dégradés présentent une potentialité de restauration du régime hydrique plus rapide que celle des sols "hardés", ce qui nous autorise à envisager leur utilisation intensive pour la production agricole.

Cette étude agropédologique concernant l'incidence de petits ouvrages hydro-agricoles sur les modifications du régime hydrique de vertisols plus ou moins dégradés a soulevé plusieurs interrogations.

*Il conviendra ainsi de préciser l'incidence des caractéristiques minéralogiques, chimiques et structurales des argiles sur le comportement agronomique in situ de différents types de sols, ce qui par ailleurs permettrait de prévoir les possibilités d'amélioration de leur régime hydrique, notamment ceux des sols les plus dégradés tels que les sols "hardés".*

D'après les travaux de TESSIER *et al.* (1991) sur les vertisols français, la capacité d'échange cationique et la surface externe des argiles sont les propriétés les plus appropriées à la prédiction du comportement des sols vertisoliques vis à vis de l'eau. Au Nord-Cameroun, YERIMA *et al.* (1989) ont établi des corrélations entre différentes propriétés physiques et chimiques sur deux types de vertisols. Ils montrent entre autres que les mouvements de retrait et gonflement, caractérisé par un coefficient d'extensibilité linéaire, peut être déduit du pourcentage total en argiles, lui même en relation étroite avec la capacité d'échange cationique et la surface externe des constituants argileux.

Rejoignant les propos de BRABANT (1987), ces observations pourraient servir à préciser la classification des vertisols du Nord-Cameroun. En effet, ce dernier remarque que les pédologues définissent deux types de vertisols sur les 1,2 millions d'hectare recensés dans la région, alors que dans la même temps, les paysans en distinguent un très grand nombre. BRABANT (1987) définit ainsi pour le Nord-Cameroun cinq types de vertisols, considérant, en plus des caractères déjà utilisés pour la classification des vertisols, d'autres paramètres tels que : la topographie, le pédoclimat et le

régime hydrique, le matériau parental, les sols associés dans la toposéquence, les propriétés de l'horizon de surface (microrelief, fentes de retrait, quantité d'argile, structure) et enfin le niveau de dégradation.

*Cette caractérisation pédologique et fonctionnelle doit être complétée par une meilleure connaissance des incidences climatiques et humaines dans la dégradation des vertisols.* Ce dernier point, concernant l'influence de l'exploitation du milieu par l'homme, nous renseignera non seulement sur les processus de dégradation mais également sur les objectifs et les moyens à mettre en oeuvre pour la réhabilitation des terres marginales. De même, cette approche systémique de l'exploitation agro-pastorale du milieu naturel devrait nous renseigner sur l'applicabilité des nouvelles pratiques de gestion des eaux de pluie.

## BIBLIOGRAPHIE

- AHMAD (N.), 1988.-** Management of vertisols in the humid tropics. *In Vertisols: their distribution, properties, classification and management, p97-115. Edited by L.P. WILDING and R. PUENTES, Texas A&M University Printing Center, college station, Texas.*
- ALBERGEL (J.), PEREZ (P.), VAKSMANN (M.), 1991.-** Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. *In Soil water balance in the Sudano-sahelian zone, p483-496. Edited by M.V.K. SIVAKUMAR, J.S. WALLACE, J. RENARD & C. GIROUX, IAHS Publ. n°199. IAHS press, Institute of hydrology, Wallingford, U.K.*
- ALLEN (M.F.), 1988.-** Below-ground structure: a key to reconstructing a productive arid ecosystem. *In The reconstruction of disturbed arid lands: an ecological approach p113-135. Edited by E.A. ALLEN, Westview press, Boulder, CO. USA.*
- A.F.E.S., 1988.-** Référentiel pédologique français. 2<sup>ème</sup> proposition, novembre 1988. *Ed. INRA, 251p.*
- BARBERY (J.), GAVAUD (M), 1980.-** Carte pédologique du Nord-Cameroun, à 1/100000: feuille Bogo-Pouss. *Notice n°8, ORSTOM Paris, 58p.*
- BERDNT (R.D.), COUGHLAN (K.J.), 1976.-** The nature of changes in bulk density with water content in a cracking clay. *Aust. J. Soil Res. 15:27-37.*
- BLAKE (G.), SCHLICHTING (E.), ZIMMERMANN (U.), 1973.-** Water recharge in a soil with shrinkage cracks. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37:669-672.*
- BOUMA (J.), DEKKER (L.W.), 1979.-** A case study on infiltration into dry clay soil, I. Morphological observations. *Geoderma, 20:27-40.*
- BOURGEAT (F.), 1972.-** Sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire. *Mémoires ORSTOM, 335p.*

- BOUTRAIS (J.), BOULET (J.), BEAUVILLAIN (A.), GUBRY (P.), BARRETEAU (D.), DIEU (M.), BRETON (R.), SEIGNOBOS (C.), PONTIE (G.), MARGUERAT (Y.), HALLAIRE (A.), FRECHOU (H.), 1984.-** Le Nord Cameroun. Des hommes, une région. *Editions de l'ORSTOM. Coll. Mémoires n°102, Paris, 550p.*
- BRABANT (P.), 1987.-** Selection of sites for the vertisols network: Distinction between types of vertisols. *In Management of vertisols under semi-arid conditions p 65-70. Edited by LATHAM (M.), AHN (P.), ELLIOTT (C.R.). IBSRAM Proceedings n°6, Bangkok, Thailand.*
- BRABANT (P), GAVAUD (M), 1985.-** Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun. *Coll. cartes et notice explicative n°103. Ed. ORSTOM, MESRES-IRA Yaoundé, ORSTOM Paris. 285p + 6 cartes couleur hors texte.*
- BRADSHAW (A.D.), 1987.-** Restoration: an acid test for ecology. *In Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research p23-29. Edited by W.R. JORDAN, M.E. GILPIN & J.D. ABER, Cambridge university press, Cambridge (U.K.)*
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989.-** Les états de surface de la zone sahéenne. Influence sur l'infiltration. *Ed. ORSTOM, Coll. Didactiques, Paris, 229p.*
- CEE, 1988.-**Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau (Nord Cameroun). *Rapport final. Contrat TSD A-216-CAM (DG12-CEE). MESRES-ORSTOM-CNRS.*
- CHAIEB (M.), 1987.-** Influence des réserves hydriques du sol sur le comportement comparé de quelques espèces végétales de la zone aride tunisienne. *Thèse Doct. USTL, Montpellier. 293p.*
- CHAN (K.Y.), 1982.-** Shrinkage characteristics of soil clods from a grey clay under intensive cultivation. *Aust. J. Soil Res. 20:65-68.*
- CHOPART (J.L.), 1989.-** Méthodes d'étude de l'enracinement à mettre en oeuvre dans le projet de recherche R3S PF2 (amélioration de l'alimentation hydrique par les techniques culturales). *Note technique n°04/89/syst. IDESSA, Côte d'Ivoire.*
- COUCHAT (P.), 1974.-** Mesure neutronique de l'humidité des sols. *Thèse d'état. Université Paul Sabatier, Toulouse, 123p.*
- DAGET (P.), POISSONNET (J.), 1971.-** Une méthode d'analyse phytoécologique des prairies. Critères d'application. *Annales agronomiques, 22(1):5-41.*



- DANCETTE (C.), 1983.-** Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.* 38(4):281-294.
- DANCETTE (C.), 1991.-** Critique des recherches sur le bilan hydrique en zone soudano-sahélienne. In *Soil-water balance in the Sudano-Sahelian zone* p45-62. Edited by M.V.K. SIVAKUMAR, J.S. WALLACE, C. RENARD & C. GIROUX, IAHS Publ. n°99. IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- DONFACK (P.), 1991.-** Dynamique de la végétation après abandon de la culture au Nord-Cameroun. In *Séminaire sur la jachère en Afrique de l'ouest, 3-5 décembre 1991, Montpellier, ORSTOM, CNRS, UNESCO, OSS.*
- DUCHAUFOUR (P.), 1965.-** Précis de pédologie. Ed. Masson, Paris, 438p.
- DUDAL (R), 1965.-** Dark clay soils of tropical and subtropical regions. *FAO agricultural Development paper n°83, FAO, Rome.*
- DUDAL (R.), ESWARAN (H.), 1988.-** Distribution, properties and classification of vertisols. In *Vertisols: their distribution, properties, classification and management* p1-22. Edited by L.P. WILDING and R. PUENTES, Texas A&M University Printing Center, college station, Texas.
- ECKEBIL (J.P.), BARRAULT (J.), VAILLE (J.), 1972.-** Points des travaux de l'IRAT sur les sorghos repiqués du Nord Cameroun. *Agron. Trop. vol XXVII, 8:791-814.*
- ELDIN (M.), 1989.-** Analyse et prise en compte des risques climatiques pour la production végétale. In *Le risque en agriculture* p47-63. Ed. ORSTOM, Coll. A travers champs, Paris.
- EYOG MATIG (O.), 1989.-** Quelques tentatives de récupération des sols stériles. Plantations forestières dans le Nord Cameroun. In *IFS (International Foundation for Science), proceedings of a regional seminar on Trees for development in Sub-Saharan Africa, february 20-25, 1989, Nairobi, Kenya.*
- FELLER (C.), LAVELLE (P.), ALBRECHT (A.), 1991.-** La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux. Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion. In *Séminaire sur la jachère en Afrique de l'ouest, 3-5 décembre 1991, Montpellier, ORSTOM, CNRS, UNESCO, OSS.*
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1984.-** Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. bot. Fr., 131, Actual. bot. (2/3/4):265-275.*

- FLORET (C.), PONTANIER (R.), SEINY BOUKAR (L.), 1991.-** Plant-Soil-Water relationships in a sahelo-soudanian savannah: the case of Northern Cameroon vertisols. *Can. J. Soil Sci.* (accepté).
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1991.-** Recherches sur la jachère en Afrique Tropicale. In *Séminaire sur la jachère en Afrique de l'ouest, 3-5 décembre 1991, Montpellier, ORSTOM, CNRS, UNESCO, OSS.*
- FOX (W.E.), 1964.-** A study of bulk density and water in a swelling soil. *Soil Sci.* 98:307-316.
- FRANQUIN (P.), FOREST (F.), 1977.-** Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.* 22:7-11.
- FREEBAIRN (D.M.), WOCKNER (G.H.), 1986.-** A study of soil erosion on vertisols of the eastern darling downs, Queensland. I Effects of surface conditions on soil movement within contour bay catchments. *Aust. J. Soil Res.*, 24:135-158.
- FREEBAIRN (D.M.), WOCKNER (G.H.), 1986.-** A study of soil erosion on vertisols of the eastern darling downs, Queensland. II The effects of soil, rainfall, and flow conditions on suspended sediment losses. *Aust. J. Soil Res.*, 24:159-172.
- GARDNER (E.A.), COUGHLAN (K.J.), SILBURN (D.M.), 1988.-** Soil water measurement and management on vertisols in Queensland, Australia. In *Management of vertisols in sub-saharan africa, p 131-165. Edited by S.C. JUTZI, I. HAQUE, J. MACINTIRE, J.E.S. STARES, ILCA, Addis Ababa, Ethiopia.*
- GAVAUD (M.), 1971.-** Les sols "hardés" du Nord Cameroun. (Sols halomorphes, sols lessivés, planosols, sols hydromorphes). Mise au point bibliographique. *Bull. Liais. thème B n°2, 1971. ORSTOM, Paris, p55-88.*
- GOMMES (R.A.), 1983.-** Pocket computers in agrometeorology. In *FAO Plant production and protection paper, n°45 p31-41. Edited by Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.*
- GORSOU (P.), 1983.-** Contribution à l'étude du "muskwari" dans le Nord-Cameroun: les relations sol-plante sous l'aspect du bilan hydrique. *Mémoire de fin d'étude ENSA Centre Universitaire de Dschang, ronéo, 65p.*
- GREACEN (E.L.), HIGNETT (C.T.), 1979.-** Sources of bias in the field calibration of a neutron meter. *Aust. J. Soil Res.* 17:405-415.

- GROUZIS (M.), 1988.-** Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina Faso). *Ed. ORSTOM, coll. Etudes et thèses, Paris, 336p.*
- GROUZIS (M.), NIZINSKI (J.), AKPO (E.), 1991.-** L'arbre et l'herbe au Sahel. Influence de l'arbre sur la structure spécifique et la production de la strate herbacée et la régénération des espèces ligneuses. *Texte dactylographié, IVème Congrès International des Terres de Parcours, 22-26 avril 1991, Montpellier, France, 11p.*
- GUIS (R), 1976.-** Un bilan des travaux visant à la mise en culture des sols hardé du Nord Cameroun. *Agron. Trop. 31(2):141-158.*
- HENIN (S.), 1976.-** Cours de physique du sol. Volume I: texture, structure, aération. *Initiations, documents techniques, 28. ORSTOM, Paris, Editest-Bruxelles, 159p.*
- HILLEL (D.), 1974.-** L'eau et le sol. Principes et processus physiques. *Ed. Vander, 288p.*
- HODGSON (A.S.), CHAN (K.Y.), 1982.-** The effect of short-term waterlogging during furrow irrigation of cotton in a cracking grey clay. *Aust. J. Agric. Res. 33:109-116.*
- HODNETT (M.G.), BELL (J.P.), 1986.-** Soil moisture investigations of groundwater recharge trough black cotton soils in Madhya Pradesh, India. *Hydr. Sc. J. 31:361-381.*
- HOOGMOED (W.B.), BOUMA (J.), 1980.-** A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. J. 44:458-461.*
- HUMBEL (F.X.), 1965.-** Etude des sols halomorphes du Nord-Cameroun (Maroua). Transformation des "hardés" par sous-solage et culture du cotonnier. *Rapport centre ORSTOM Yaoundé, Cameroun, 146p.*
- IRA-CNS, 1989.-** Réhabilitation et utilisation de terres marginales du Nord-Cameroun. Rapport de campagne 1989. *Projet CEE-MESIRES IRA-CNRS-ORSTOM TS 2A/0077/M(CD), roneo 58p + annexes.*
- IRA-CNS, 1990.-** Réhabilitation et utilisation de terres marginales du Nord-Cameroun. Rapport de campagne 1990. *Projet CEE-MESIRES IRA-CNRS-ORSTOM TS 2A/0077/M(CD), roneo 50p + annexes.*
- JAGGI ( ), ET AL, 1977.-** Field balance in a vertisol under fallow and cropped conditions. *Indian J. agric. Sci. 47(12):617-621.*
- JAILLARD (B.), CABIDOUCHE (Y.M.), 1984.-** Etude de la dynamique de l'eau dans un sol argileux gonflant: dynamique hydrique. *Science du sol, 3:187-198.*

- JUTZI (S.), ABEDE (M.), 1987.-** Improved agricultural utilization of vertisols in the Ethiopian highlands- an interinstitutional approach. *Edited by M. LATHAM, P. AHN, C.R. ELLIOTT, p 175-183. IBSRAM Proceedings n°6, Bangkok, Thailand.*
- LASCANO (R.J.), 1991.-** Reviews of models for predicting soil water balance. *In Soil water balance in the Sudano-sahelian zone p443-458. Edited by M.V.K. SIVAKUMAR, J.S. WALLACE, J. RENARD & C. GIROUX, IAHS Publ. n°199. IAHS press, Institute of hydrology, Wallingford, U.K.*
- LETOUZEY (R.), 1985.-** Carte phytogéographique du Cameroun au 1/500000. 1. Domaine sahélien et soudanien. *Herbier national IRA , Yaoundé, Institut de la carte internationale de la végétation, Toulouse, p1-26.*
- LOCH (R.J.), DONOLLAN (T.E.), 1982.-** Field rainfall simulator studies on two clay soils of the Darling Downs, Queensland. I The effects of plot length and tillage orientation on erosion processes and run off and erosion rates. *Aust. J. Soil. Res. 21:33-46.*
- LOCH (R.J.), DONOLLAN (T.E.), 1982.-** Field rainfall simulator studies on two clay soils of the Darling Downs, Queensland. II Aggregate breakdown, sediment properties and soil erodibility. *Aust. J. Soil. Res. 21:47-58.*
- MARTIN (D.), 1963.-** Carte pédologique du Nord-Cameroun. Feuille Kaélé à 1/100000. *IRCAM-ORSTOM, Paris. 100p multigr. 1 carte couleur hors texte.*
- MARATHEE (M.), 1970.-** Les différentes variétés de sorghos dans le Diamaré, Nord-Cameroun. *In Rapport analytique IRAT div. agronomie année 1970, Montpellier, France.*
- MILLEVILLE (P.), 1989.-** Activités agro-pastorales et aléa climatique en région sahélienne. *In Le risque en agriculture p233-241. Ed. ORSTOM, Coll. A travers champs, Paris.*
- MITCHELL (A.J.B.), 1987.-** Management problems of cotton on vertisols in the lower shire valley of Malawi. *In Management of vertisols under semi-arid conditions p 221-229. Edited by M. LATHAM, P. AHN, C.R. ELLIOTT. IBSRAM Proceedings n°6, Bangkok, Thailand.*
- OLIVRY (J.C.), 1983.-** Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Ségambie et aux Iles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrologie, vol.XX, 1:47-69.*

- OLIVRY (J.C.), 1986.-** Fleuves et rivières du Cameroun. *Collection "Monographies Hydrologiques" ORSTOM n°9, Paris.*
- PEDRO (G), 1976.-** Sols argileux et argiles. Eléments généraux en vue d'une introduction à leur étude. *Sciences du sol, 2:69-84.*
- PEDRO (G.), 1987.-** Géochimie, minéralogie et organisation des sols: aspects coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol.XXIII, 3:169-186.*
- PELTIER (R.), EYOG MATIG (O.), 1989.-** Les essais d'agroforesterie au Nord Cameroun. *BFT n°217:3-31.*
- PELTIER (R), 1991.-** Gestion des jachères arborées en Afrique de l'Ouest; effet de quelques facteurs sur leur productivité en biomasse. *In Séminaire sur la jachère en Afrique de l'ouest, 3-5 décembre 1991, Montpellier, ORSTOM, CNRS, UNESCO, OSS.*
- PODWOSJEWSKI (P.), 1988.-** Les vertisols de Nouvelle-Calédonie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 24(4):279-301.*
- PONTANIER (R.), MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEINY BOUKAR (L.), THEBE (B.), 1984.-** Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord-Cameroun soumis à des averses contrôlées. *MESRES-IRA-IRGM, Yaoundé, Cameroun, 71p.*
- PONTANIER (R.), THEBE (B.), 1989.-** Etude du ruissellement au Nord-Cameroun transfert de la parcelle au bassin versant. *Hydrol. Continent. 4(1):57-69.*
- PHILLIPEAU (G.), 1986.-** Comment interpréter les résultats d'une analyse en composante principale. *ITCF.*
- PUNTES (R.), HARRIS (B.L.), VICTORA (C.), 1988.-** Management of vertisols of temperate regions. *In Vertisols: their distribution, properties, classification, and management p 129-145. Edited by L.P. WILDING and R. PUNTES, Texas A&M University Printing Center, college station, Texas.*
- RIOU (C.), 1980.-** Aspects climatiques de la sécheresse de part et d'autre du sahara (de l'Afrique centrale sèche à la Tunisie). *Cah. ORSTOM, sér. Biol., 42:43-51.*
- ROUPSARD (M), 1987.-** Nord-Cameroun. Ouverture et développement. *Thèse de doctorat d'Etat en géographie, Univ. de Paris X, Coutances, 516p.*
- SCHMIDT (F.), MOUTONNET (P.), 1985.-** Analyse de l'erreur d'étalonnage d'une sonde de mesure neutronique de l'humidité des sols. *Bull. G.F.H.N., 18:55-67.*

- SEGALEN (P.), 1962.-** Carte pédologique du Nord-Cameroun à 1/100000: feuille Maroua(imprimée). *ORSTOM Yaoundé, + notice: 72p multigr.*
- SEGALEN (P.), VALLERIE (M.), 1963.-** Carte pédologique du Nord-Cameroun à 1/100000: feuille Mokolo (imprimée). *IRCAM, Yaoundé, ORSTOM, Paris, 72p multigr. + 2 cartes couleur hors texte à 1/100000 et 2 cartes hors texte à 1/50000.*
- SEGHIERI (J.), 1990.-** Dynamique saisonnière d'une savane soudano-sahélienne au Nord-CAMeroun. *Thèse Doct. USTL, Montpellier, 200p.*
- SEIGNOBOS (C.), in press.-** *Hardé et Karal* du Nord Cameroun; leur perception agro-pastorale par les populations du Diamaré. *Bulletin spécial Bois et Tropiques.*
- SEINY BOUKAR (L.), 1990.-** Régime hydrique et dégradation des sols dans le Nord-Cameroun. *Thèse 3ème cycle, Univ. Yaoundé, Cameroun, 226p.*
- SICOT (M.), 1989.-** Contraintes et risques hydriques encourus par l'activité agro-pastorale au Sahel. Exemple de la mare d'Oursi au Burkina Faso. *In Le risque en agriculture p131-142. Ed. ORSTOM, Coll. A travers champs, Paris.*
- SIEFFERMANN (G.), 1963.-** Carte pédologique du Nord-Cameroun à 1/100000. Feuille de Kalfou. *IRCAM-Yaoundé, ORSTOM, Paris, 65p multigr. + 1 carte couleur.hors texte.*
- SINGH (L.), NDIKAWA (R.), 1989.-** Annual progress report, 1989, Sorghum millet agronomy, Maroua. *Agronomic Research Center, Maroua, Cameroon, 41p.*
- SMEDEMA (L.K.), 1984.-** Furrow irrigation design for vertisols. *Agri. Water. Manag. 9:211-218.*
- STIRK (G.B.), 1954.-** Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Aust. J. Agric. Res. 23:279-285.*
- SWINDALE (L.D.), 1988.-** Developping, testing and transferring improved vertisol technology: the Indian experience. *In Management of vertisols in sub-saharan africa, p 13-43. Edited by S.C. JUTZI, I. HAQUE, J. MACINTIRE, J.E.S. STARES, ILCA, Addis Ababa, Ethiopia.*

- TESSIER (D.), 1990.-** Behaviour and microstructure of clay minerals. *In Soil colloids and their associations in aggregates, p 387-415. Edited by M. DE BOODT, M. HAYES & A. HERBILLON, Plenum Press, New York.*
- TESSIER (D.), PEDRO (G.), 1980.-** Sur les propriétés des de gonflement dans les sols. *Comptes Rendus Acad. Sc. Paris, t. 291. Série D. p461-464.*
- TESSIER (D.), CAMARA (L.), PEDRO (G.), 1980.-** Sur le comportement hydrique et l'évolution des organisations des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *Compte-rendu Acad. Sciences, Paris, 290, D:1169-1172.*
- TESSIER (D.), BRUAND (A.), CABIDOCHÉ (Y.M.), 1991.-** Vertisols of France. *In Proceedings of the Sixth International Soil Correlation Meeting (VI ISCOM): Characterization, classification and utilization of cold aridisols and vertisols p 227-231. Edited by J.M. KIMBLE, Soil Management Support Service USDA.*
- THEBE (B.), 1987.-** Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. *Thèse Doct. USTL, Montpellier, 306p.*
- TOUTAIN (B.), PIOT (J.), 1980.-** Mises en défens et possibilités de régénération des ressources forragères sahéliennes. Etudes expérimentales dans le bassin de la mare d'Oursi (Haute-Volta). *Rapport IEMVT/GERDAT, 156p.*
- UNESCO, 1977.-** Carte de la répartition mondiale des régions arides. *Notes techniques du MAB, n°7. Unesco, Paris.*
- VAILLE (J.), 1970.-** Essais de mise en valeur des sols "hardés" du Nord cameroun. *Agron. Trop. 25(5):472-490.*
- VALENTIN (C.), 1981.-** Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez, Rép. du Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau. *Coll. Etudes et thèses, ed. ORSTOM, Paris, 1985, 259p.*
- VERNIER (P.), ABOUBAKAR (Y.), TCHARI (B.), 1987.-** Le système de double culture riz pluvial-sorgho mouskwari au Cameroun. Essais préliminaires. *Agron. Trop. 42(4):280-288.*
- VIRMANI (S.M.), 1988.-** Agroclimatology of the vertisols and vertic soil areas of Africa. *In Management of vertisols in sub-saharan africa p45-63. Edited by S.C. JUTZI, I. HAQUE, J. MACINTIRE, J.E.S. STARES, ILCA, Addis Ababa, Ethiopia.*

- VIRMANI (S.M.), BURFORD (J.R.), SAHRAWAT (K.L.), 1985.-** Improved management systems for vertisols in India. *In Taxonomy and management of vertisols and aridisols (proc. of 5<sup>th</sup> International Soil Classification Workshop, Sudan, 2-11 november 1982) p275-283. Khartoum, Sudan, Soil Survey Administration.*
- WILDING (L.P.), PUENTES (R.), 1988.-** Vertisols: their distribution, properties, classification, and management. *Ed. Texas A&M University Printing Center, college station, Texas.*
- WILDING (L.P.), TESSIER (D.), 1988.-** Genesis of vertisols: shrink-swell phenoma. *In Vertisols: their distribution, properties, classification, and management p55-81. Edited by L.P. WILDING and R. PUENTES, Texas A&M University Printing Center, college station, Texas.*
- YERIMA (B.P.K.), WILDING (L.P.), HALLMARK (C.T.), CALHOUN (F.G.), 1989.-** Statiscal relationships among select properties of Northern Cameroon vertisols and associated vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. J. 53:1758-1763.*
- YULE (D.F.), 1987.-** Water management of vertisols in the semi-arid tropics. *In Management of vertisols under semi-arid conditions p107-123. Edited by M. LATHAM, P. AHN, C.R. ELLIOTT. IBSRAM Proceedings n°6, Bangkok, Thailand.*
- ZEIN EL ABEDINE (A.), GLENN (H.R.), TYEGO (J.), 1969.-** A study of certain physical properties of a vertisol in the Gezira area, Republic of Sudan. *Soil Sci. 108(5):359-366.*



## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

Figure 1.1 : Dynamique des systèmes écologiques d'une séquence vertisolique du Nord Cameroun (Mouda), d'après SEYNI BOUKAR (1990).

### Chapitre II

Figure 2.1 : Situation géographique du secteur d'étude (carte de l'Extrême Nord d'après BOUTRAIS et al., 1984).

Figure 2.2 : Hauteurs précipitées annuelles à Maroua de 1947 à 1989.

Figure 2.3 : Paysages pédologiques au Nord Cameroun d'après BRABANT et GAVAUD (1985) in SEINY BOUKAR (1990).

Figure 2.4 : Principales zones de vertisols et des sols vertiques en Afrique tropicale et subtropicale d'après DUDAL (1965).

Figure 2.5 : Facteurs de formation d'argiles de type smectite et conséquences de leur accumulation d'après PODWOSJEWSKI (1988).

Figure 2.6 : Répartition schématique des systèmes écologiques de Mouda (coupe) (d'après PONTANIER et al, 1984).

### Chapitre III

Figure 3.1 : Schéma descriptif des aménagements pitting, microcatchment et bandes alternées.

Figure 3.2 : Plan d'expérience; situation des parcelles expérimentales sur la réhabilitation des terres marginales.

Figure 3.3 : Relation entre la densité apparente et la teneur en eau selon le modèle de FOX (1964).

### Chapitre IV

Figure 4.1 : Pluviosité en 1989 et 1990 sur les sites expérimentaux de Mouda, sols "hardés" et vertisol dégradé.

Figure 4.2 : Profils hydriques sur sol "hardé", à différentes dates au cours de la saison 1990.

Figure 4.3 : Evolution de l'humidité volumique sur sol "hardé" aux profondeurs 20 cm, 30 cm, 40 cm et 50 cm en 1990.

Figure 4.4 : Evolution de la réserve en eau totale sur sol "hardé" en 1990, sur les tranches 0-40 cm, 40-100 cm et 0-100 cm, pour les traitements bandes alternées, microcatchment, pitting et témoin.

Figure 4.5 : Evolution de la Contribution Spécifique de Présence en 1990, pour les principales espèces sur les sols "hardés", en fonction de la date

et de l'aménagement d'après les données de IRA-CNS (1989) et IRA-CNS (1990).

- Figure 4.6 : Influence du pitting sur le profil hydrique à 20 cm et 40 cm de la bordure du trou, et dans le trou, sur sol "hardé" en octobre 1990.
- Figure 4.7 : Schématisation du fonctionnement hydrique des aménagements avec impluvium sur sols "hardés".
- Figure 4.8 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec labour+buttage et culture de saison des pluies, en 1990.
- Figure 4.9 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec labour seul et culture de saison des pluies, en 1990.
- Figure 4.10 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle témoin et culture de saison des pluies, en 1990.
- Figure 4.11 : Evolution comparée de l'humidité volumique en 1990, à la profondeur de 70 cm, pour les traitements labour, labour avec buttage et témoin.
- Figure 4.12 : Evolution comparée du stock d'eau total en 1990, sur les tranches 0-50 cm, 50-100 cm et 0-100 cm pour les itinéraires avec labour, labour+buttage et témoin, sur vertisols dégradés et sous culture de saison des pluies.
- Figure 4.13 : Cercles de corrélations des analyses en composantes principales sur les composantes du rendement du sorgho pluvial (Djigaari) en 1989 et 1990, à partir des 60 observations sur les 6 parcelles expérimentales.
- Figure 4.14 : Profils racinaires, sur parcelle labourée, au paroxysme du développement d'un sorgho de saison des pluies sur vertisols dégradés en 1990; méthode de la grille d'après CHOPART (1989).
- Figure 4.15 : Evolution des réserves hydriques disponibles, en 1990, sur vertisols dégradés, et sous culture d'un sorgho de saison des pluies.
- Figure 4.16 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec aménagement en casiers sous culture de contre-saison en 1990.
- Figure 4.17 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle avec aménagement en microcatchment sous en culture de contre-saison en 1990.
- Figure 4.18 : Evolution de l'humidité volumique, et profils hydriques pendant les phases d'humectation et de dessèchement sur vertisol dégradé, parcelle témoin sous en culture de contre-saison en 1990.
- Figure 4.19 : Evolution comparée des réserves hydriques totales en 1990, sur les tranches 0-50 cm, 50-100 cm et 0-100 cm, pour les aménagements en casiers, microcatchment et témoin, sur vertisols dégradés sous culture de contre-saison.
- Figure 4.20 : Profils racinaires sous culture de sorgho de contre-saison sur vertisol dégradé avec aménagement en casiers.

Figure 4.21 : Evolution des réserves hydriques disponibles, en 1990, sur vertisols dégradés sous culture de contre-saison.

Figure 4.22 : Relation entre la variation des réserves hydriques totales sur 0-70 cm entre le 7 juin et le 4 juillet 1990, et l'humidité volumique maximale atteinte en 1990 à 70 cm de profondeur, sur l'ensemble des traitements de l'expérimentation.

Figure 4.23 : Relation entre le dessèchement relatif à 70 cm de profondeur en 1989, et la variation de stock hydrique sur la tranche 0-70 cm au cours de la saison pluvieuse suivante 1990, pour l'ensemble des traitements de l'expérimentation.

## Chapitre V

Figure 5.1 : EvapoTranspiration Réelle sur une parcelle cultivée en sorgho de saison des pluies et sur une parcelle cultivée en sorgho de contre-saison aménagée en casiers, calculée à partir de l'équation du bilan hydrique. La courbe représente l'EvapoTranspiration Potentielle calculée d'après la formule de PENMAN. Saison 1989-1990.

Figure 5.2 : Description du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés, et évolution des différents termes du bilan hydrique au cours du temps.

Figure 5.3 : Estimation de l'évolution des réserves en eau du sol sur 0-100 cm, sur un vertisol dégradé, cultivé en sorgho de saison des pluies sans aménagement, au cours de la saison 1989-1990.

Figure 5.4 : Estimation de l'évolution des réserves hydriques en 1989, de l'horizon 0-100 cm, sur vertisol dégradé aménagé en casiers.

Figure 5.5 : Estimation de l'évolution des réserves hydriques de 0-100 cm à partir des données climatiques de 1990, sur un vertisol dégradé cultivé en sorgho de saison des pluies.

Figure 5.6 : Estimation de l'évolution des réserves hydriques de 0-100 cm à partir des données climatiques de 1990, sur un vertisol dégradé aménagé en casier et cultivé en sorgho de contre-saison.

Figure 5.7 : Relation entre la réserve hydrique totale et la réserve hydrique disponible (au seuil de  $\Phi = -1,6$  MPa) sur l'horizon 0-100 cm.

Figure 5.8 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques, de l'horizon 0-100 cm, pour l'aménagement en microcatchment, comparé à la simulation de l'aménagement en casier avec culture de contre-saison, et d'une parcelle traditionnelle cultivée en sorgho de saison des pluies.

Figure 5.9 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur un aménagement en microcatchment.

Figure 5.10 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de saison des pluies, avec différentes hauteurs précipitées pour les 2 et 3èmes décades de juillet et la 1ère décade d'août.

Figure 5.11 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de contre-saison aménagée en casiers, avec différentes hauteurs précipitées pour les 2ème et 3ème décades de juillet et la 1ère décade d'août.

**Figure 5.12 : Simulation de l'évolution des réserves hydriques totales, de l'horizon 0-100 cm, sur une parcelle cultivée en sorgho de contre-saison aménagée en casiers, avec différentes hauteurs précipitées à partir du mois de septembre.**

## **Chapitre VI**

**Figure 6.1 : Amélioration du régime hydrique et réhabilitation des sols "hardés" et des vertisols dégradés .**

**Figure 6.2 : Aménagement des vertisols dégradés pour un système de double culture séquentielle, une production de saison des pluies suivi d'une culture de contre-saison (principe du lit de semence surélevé).**

**Figure 6.3 : Cartes des systèmes écologiques du bassin versant de Mouda, Nord-Cameroun.**

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre II

Tableau 2.1 : Caractéristiques climatiques principales relevées sur la station météorologique de Maroua-Salak (18 années d'observation) d'après OLIVRY(1986).

Tableau 2.2 : Répartition statistique des pluies annuelles à Maroua-Salak (OLIVRY, 1986).

Tableau 2.3 : Disponibilité en eau pour les principaux types de sols modaux au Nord Cameroun (in SEINY BOUKAR, 1990).

Tableau 2.4 : Différents types de vertisols au Nord Cameroun d'après BRABANT (1987).

Tableau 2.5 : Appréciation globale du régime hydrique des sols de la séquence de dégradation des vertisols à Mouda, d'après SEINY BOUKAR (1990).

### Chapitre III

Tableau 3.1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol "hardé" à Mouda.

Tableau 3.2 : Caractéristiques physico-chimiques du vertisol dégradé à Mouda.

Tableau 3.3 : Schéma récapitulatif des différents aménagements et façons culturales testées sur l'expérimentation de Mouda (1989-1991).

### Chapitre IV

Tableau 4.1 : Pluviosité mensuelle en 1989 et 1990 à Mouda sur les sols "hardés" et les vertisols dégradés, et de la station de Salak (d'après Olivry 1986).

Tableau 4.2 : Réserves hydriques totales et durée de présence de réserves hydriques théoriquement disponibles, pour l'horizon 0-40 cm et pour la période du 23 mai 1990 au 22 janvier 1991.

Tableau 4.3 : Analyse de variance sur les variables recouvrement et nombre d'espèces suivant 2 facteurs : aménagement (bandes alternées ou microcatchment), fonction dans l'aménagement (bande labourée réceptrice ou impluvium).

Tableau 4.4 : Calcul du coefficient  $\alpha$  de report de ruissellement de l'impluvium sur la bande labourée sur microcatchment, et du ruissellement RI au delà de la bande labourée sur l'aménagement bande alternée.

Tableau 4.5 : Réserves en eau totale (mm), à différentes dates au cours des années 1989 et 1990, pour les différents aménagements sur vertisols dégradés cultivés en saison des pluies.

**Tableau 4.6 : Analyses de variance sur les composantes du rendement d'une culture de saison des pluies (sorgho de variété traditionnelle) sur vertisol dégradé, en 1990 et en 1989.**

**Tableau 4.7 : Comparaison, entre les différents traitements, des réserves hydriques totales et disponibles, et de la durée de la disponibilité en eau, sur vertisol dégradé cultivé en sorgho de saison des pluies.**

**Tableau 4.8 : Vitesse de dessèchement à 40 cm. de profondeur sur vertisol dégradé sous culture de contre-saison.**

**Tableau 4.9 : Réserves en eau totale en 1989 et 1990 sur vertisols dégradés sous cultures de contre-saison.**

**Tableau 4.10 : Quantité de matière sèche produite et vitesse de croissance de la plante pendant la phase de montaison du sorgho de contre-saison en 1989 et 1990.**

**Tableau 4.11 : Comparaison, entre les différents traitements, des réserves hydriques totales et de la durée de la disponibilité en eau, sur vertisol dégradé cultivé en sorgho de contre-saison.**

**Tableau 4.12 : Calendrier des réserves hydriques théoriquement disponibles sur l'horizon 0-50 cm sur vertisols dégradés et sols "hardés" pour les différents aménagements en 1990.**

## TABLE DES MATIERES

	page
<b>SOMMAIRE.</b>	2
<b>AVANT PROPOS.</b>	3
<b>RESUME.</b>	5
<b>ABSTRACT.</b>	6
<b>Chapitre I. INTRODUCTION.</b>	7
<b>Chapitre II. CONTEXTE REGIONAL ET MATERIEL ETUDIE.</b>	15
<b>2.1. LES FACTEURS REGIONAUX DU MILIEU.</b>	16
2.1.1. Les conditions climatiques.	16
2.1.2. Les sols du Nord-Cameroun et leur utilisation.	21
2.1.2.1. Les principaux types de sols.	22
2.1.2.2. Erosion et dégradation des sols.	24
2.1.2.3. Disponibilité en eau et utilisation des sols.	25
<b>2.2. LES VERTISOLS ET LEUR DEGRADATION.</b>	28
2.2.1. Généralités sur les vertisols.	28
2.2.1.1. Définition et classification des vertisols.	30
2.2.1.2. Utilisation des vertisols.	34
2.2.1.3. Fonctionnement hydrique des vertisols.	35
2.2.2. Dégradation des vertisols.	36
2.2.2.1. Quelques exemples observés dans différents pays.	36
2.2.2.2. La dégradation des vertisols sur le bassin versant de Mouda au Nord-Cameroun.	37
2.2.2.2.1. Morphologie des différents stades de dégradation.	38
2.2.2.2.2. Ruissellement, efficacité des pluies et pertes en terre sur les différents faciès de dégradation des vertisols.	41
2.2.2.2.3. Dégradation et réserves en eau disponibles.	43
2.2.2.2.4. Végétation naturelle de la séquence de dégradation.	43
2.2.2.3. Conclusion sur la dégradation des vertisols.	46

<b>chapitre III. METHODES EXPERIMENTALES ET PROTOCOLE D'ETUDE.</b>	<b>47</b>
<b>3.1. LES AMENAGEMENTS TESTES ET LE PLAN EXPERIMENTAL.</b>	<b>48</b>
<b>3.1.1. Localisation des sites.</b>	<b>48</b>
3.1.1.1. Les sols "hardés".	49
3.1.1.2. Les vertisols dégradés.	49
<b>3.1.2. Les aménagements testés.</b>	<b>49</b>
<b>3.1.3. Les parcelles expérimentales et les techniques culturales appliquées.</b>	<b>51</b>
3.1.3.1. Les parcelles expérimentales sur les sols "hardés".	53
3.1.3.2. La mise en culture des vertisols dégradés.	53
3.1.3.2.1. Parcelles expérimentales avec mise en culture de saison des pluies sur vertisols dégradés.	54
3.1.3.2.2. Parcelles expérimentales avec mise en culture de contre-saison sur vertisols dégradés.	54
<b>3.2. INDICATEURS SUIVIS.</b>	<b>57</b>
<b>3.2.1. Humidité volumique et réserve hydrique des sols.</b>	<b>57</b>
3.2.1.1. Humidité pondérale, humidité volumique, stock en eau des sols.	57
3.2.1.2. Réserve utile et disponible.	58
3.2.1.3. Densité apparente et vertisols.	58
3.2.1.4. Mesures de l'humidité du sol par la méthode neutronique.	59
3.2.1.4.1. Principe de mesure et discussion.	59
3.2.1.4.2. Plan d'installation des tubes d'accès de sonde à neutrons.	61
<b>3.2.2. Suivi de la végétation spontanée et des cultures.</b>	<b>62</b>
3.2.2.1. Suivi de la végétation spontanée des sols "hardés" en voie d'amélioration.	62
3.2.2.2. Suivi des cultures sur vertisol dégradé.	63
3.2.2.2.1. Suivi du sorgho de saison des pluies.	63
3.2.2.2.2. Suivi du sorgho de contre-saison.	64



<b>chapitre IV. AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES TERRES DEGRADEES. RESULTATS DE DEUX ANNEES D'EXPERIMENTATION.</b>	<b>66</b>
4.1. PLUVIOSITE DES DEUX ANNEES EXPERIMENTALES.	67
4.2. AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES SOLS "HARDES".	69
4.2.1. Modification du régime hydrique des sols "hardés".	69
4.2.1.1. Etude comparée des profils hydriques.	69
4.2.1.2. Evolution des réserves en eau totale.	72
4.2.2. Evolution de la végétation en fonction des aménagement testés.	74
4.2.2.1. Etude de la végétation sur les traitements microcatchment et bandes alternées.	74
4.2.2.1.2. Comparaison du recouvrement global et de la richesse floristique entre les traitements microcatchment et bandes alternées.	74
4.2.2.1.2. Comparaison de la composition floristique entre les traitements microcatchment et bandes alternées.	76
4.2.2.1.3. Production de matière sèche aérienne.	78
4.2.2.2. Etude de la végétation sur le traitement le pitting.	78
4.2.3. Discussion sur le fonctionnement des différents aménagement.	79
4.2.3.1. Modification du régime hydrique par le traitement pitting.	79
4.2.3.2. Modification du régime hydrique par les traitements microcatchment et bandes alternées.	81
4.2.3.3. Conclusions à l'étude sur l'amélioration du régime hydrique des sols "hardés".	85
4.3. AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES VERTISOLS DEGRADEES.	87
4.3.1. Modification du régime hydrique des vertisols dégradés cultivés en saison des pluies.	87
4.3.1.1. Suivi des profils hydriques et évolution de l'humidité volumique au cours du temps.	87
4.3.1.2. Evolution des réserves en eau des vertisols dégradés sous culture de saison des pluies.	93
4.3.1.3. Comportement d'une culture de saison des pluies pour les différents aménagements testés.	93
4.3.1.3.1. Elaboration du rendement du sorgho sur vertisols dégradés.	95

4.3.1.3.2. Influence des différents traitements sur la culture de sorgho de saison des pluies.	97
4.3.1.3.3. Profils racinaires du sorgho de saison des pluies sur vertisol dégradé.	99
4.3.1.4. Evolution des disponibilités en eau sous culture de saison des pluies.	99
4.3.1.5. Conclusions sur l'efficacité des traitements en condition de culture de saisons des pluies.	102
4.3.2. Modification du régime hydrique des vertisols dégradés sous culture de contre-saison.	104
4.3.2.1. Suivi des profils hydriques et de l'évolution des humidités volumiques sous culture de contre-saison.	104
4.3.2.2. Evolution des réserves en eau sous culture de contre-saison.	108
4.3.2.3. Comportement agronomique du sorgho de contre-saison.	111
4.3.2.4. Evolution des réserves en eau disponible sous culture de contre-saison.	115
4.3.2.5. Conclusions sur l'efficacité des traitements en cultures de contre-saison.	115
4.3.3. Amélioration du régime hydrique et la réhabilitation des vertisols dégradés.	118
4.4. CONCLUSIONS SUR L'AMELIORATION DU REGIME HYDRIQUE DES SOLS DE LA SERIE VERTISOLIQUE DU BASSIN VERSANT DE MOUDA.	122
<b>chapitre V. MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE DES VERTISOLS DEGRADES.</b>	125
<b>5.1. PRINCIPE DE LA MODELISATION</b>	126
5.1.1. Equation du bilan hydrique.	126
5.1.2. Mesure et estimation des termes du bilan hydrique.	127
5.1.2.1. Ruissellement et drainage.	127
5.1.2.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle.	128
<b>5.2. MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE.</b>	130
5.2.1. Schéma hypothétique du fonctionnement hydrique des vertisols dégradés.	130
5.2.2. Estimation des différents paramètres nécessaires à la modélisation.	131
5.2.3. Simulation de l'évolution des réserves hydriques et ajustement du modèle.	132
5.2.3.1. Simulation pour une culture traditionnelle de sorgho de saison des pluies.	134

5.2.3.2. Simulation pour une culture de sorgho de contre saison avec aménagement en casiers en 1989.	134
5.2.3.3. Simulation sur les données climatiques de la saison 1990-1991.	136
<b>5.3. TENTATIVE D'ETUDE DE L'EVOLUTION DES RESERVES HYDRIQUES TOTALES A L'AIDE DE LA MODELISATION.</b>	<b>138</b>
5.3.1. Evolution prévisible des réserves en eau totale pour un aménagement microcatchment.	139
5.3.2. Influence d'une période de sécheresse pendant la saison des pluies.	141
<b>5.4. CONCLUSION A LA MODELISATION DU REGIME HYDRIQUE DES VERTISOLS.</b>	<b>145</b>
<b>chapitre VI. AMENAGEMENT DES SOLS "HARDES" ET DES VERTISOLS DEGRADES AU NORD-CAMEROUN.</b>	<b>147</b>
6.1. REGENERATION DES SOLS "HARDES"...	148
6.1.1. Fonctionnement hydrique et régénération des sols "hardés".	148
6.1.2. Amélioration du statut organique et de la porosité biologique.	151
6.2. MISE EN CULTURE DES VERTISOLS DEGRADES.	152
6.2.1. Utilisation des vertisols dégradés en culture de contre-saison.	153
6.2.2. Utilisation des vertisols dégradés en culture de saison des pluies.	155
6.2.3. Voie d'intensification de l'utilisation des vertisols dégradés.	156
6.3. REFLEXIONS SUR LE BASSIN VERSANT DE MOUDA.	157
6.4. CONCLUSIONS SUR L'AMENAGEMENT DES SOLS "HARDES" ET DES VERTISOLS DEGRADES.	161
<b>chapitre VII. CONCLUSION GENERALE.</b>	<b>162</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.</b>	<b>167</b>
<b>LISTE DES FIGURES.</b>	<b>177</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.</b>	<b>181</b>
<b>TABLE DES MATIERES.</b>	<b>183</b>